

**VAASAN YLIOPISTO**

**TEKNILLINEN TIEDEKUNTA**

**SÄHKÖTEKNIikka**

Jommi Tervo

**KAASUERISTEISEN SÄHKÖASEMAN YLIJÄNNITESUOJAUS**

Diplomityö, joka on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten

Vaasassa 18.03.2013

Työn valvoja

Professori Kimmo Kauhaniemi

Työn ohjaaja

DI Rauno Hirvonen

Työn tarkastaja

Professori Timo Vekara

## ALKULAUSE

Tämä diplomityö on tehty ABB Oy:n Power Systems -divisioonaan kuuluvaan Substations -yksikköön Vaasassa. Haluan kiittää kaikkia työn valmistumisessa edesauttaneita.

Erityiskiitokset haluan osoittaa ohjaajalleni DI Rauno Hirvoselle sekä insinööri Seppo Pastolle, joiden kanssa löysimme mielenkiintoisen aiheen diplomityölleni. Lisäksi kiitän Rauno Hirvosta hänen avunannostaan ja näkökulmistaan työn teknisissä haasteissa.

Kiitän myös suuresti Professori Kimmo Kauhaniemeä työn valvonnasta, tarkastamisesta ja asiantuntevista neuvoista sekä simulointiohjelmaan että kirjoitusprosessiin liittyen. Lisäksi kiitän Professori Timo Vekaraa hänen asiantuntevista kommentistaan työn tarkastusvaiheessa.

Arvokkaat kiitokset ansaitsevat myös läheiseni, ystäväni, opiskelutoverini sekä tietenkin puolisoni Tiia-Mari ja poikani Jimi jaksamisesta ja työhön innostamisesta.

Vaasassa 18.03.2013

Jommi Tervo

## SISÄLLYSLUETTELO

ALKULAUSE	2
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	5
TIIVISTELMÄ	10
ABSTRACT	11
1 JOHDANTO	12
2 KAASUERISTEINEN SÄHKÖASEMAKOJEISTO	14
2.1 GIS:n historia	17
2.2 GIS-laitosten kotelointiperiaatteet	18
2.3 GIS-kojeistoon liittyminen	19
3 YLIJÄNNITTEET	21
3.1 Ylijännitteiden synty ja luokittelu	21
3.1.1 Pientaajuiset ylijännitteet	24
3.1.2 Loivat transienttiylijännitteet	24
3.1.3 Jyrkät transienttiylijännitteet	24
3.1.4 Erittäin jyrkät transienttiylijännitteet	27
3.2 Ylijännitteiden kulku	27
3.2.1 Kulkuaallon eteneminen	28
3.2.2 Aaltoimpedanssi ja etenemisnopeus	30
3.2.3 Kulkuaallon teho ja energia	31
3.2.4 Kulkuaallon vaimeneminen	32
3.2.5 Kulkuaallon heijastuminen	33
4 ERISTYSKOORDINAATIO	34
4.1 Eristyskoordinaation periaatteet ja toteutus	34
4.1.1 Marginaalimenetelmä	37
4.1.2 Tilastollinen menetelmä	38
4.1.3 Standardoidut koejännitteet	38
4.2 Eristyskoordinaatio käytännössä	41
5 YLIJÄNNITTEIDEN RAJOITTAMINEN	42
5.1 Ukkosjohtimet	43
5.2 Pylväsmadoitukset	45
5.3 Ylijännitesuojat	45
5.3.1 Suojakipinävälit	46
5.3.2 Venttiilisuojat	47
5.3.3 Kaasueristeinen ylijännitesuoja	51
5.3.4 Muita ylijännitteiden rajoittamiskeinoja	52
6 VENTTIILISUOJAN VALINTAKRITEERIT JA SIJOITUS	53
6.1 Suojan valintaprosessi	53

6.2	Suojan sijoitus	55
6.3	GIS-kojeiston suojauksessa huomioitavat seikat	57
7	ESIMERKKITAPPAUS JA SEN SIMULOINTI	58
7.1	Lähtökohdat tutkimukselle	58
7.2	Suora salamanisku	60
7.2.1	Suurin salamavirta	60
7.2.2	Kriittinen salamavirta	62
7.2.3	Salamaimpulssin rinnan nousuaika	64
7.2.4	Selän puoliarvonaika	65
7.3	Takaisku	66
7.3.1	Takaiskun aiheuttava minimivirta	66
7.3.2	Takaiskun maksimivirta	66
7.3.3	Salamaimpulssin rinnan nousuaika	67
7.3.4	Selän puoliarvonaika	68
7.4	Ylijännitesuojan energianpurkaustarve	68
7.5	Simulointimalli	69
7.5.1	Lähtökohdat ja -tiedot	69
7.5.2	Avojohtolinja	70
7.5.3	Maakaapeli	71
7.5.4	GIS-kojeisto ja katkaisija	71
7.5.5	Ylijännitesuoja	72
7.5.6	Salamaimpulssigeneraattori suoralle salamaniskulle	73
7.5.7	Salamaimpulssigeneraattori takaiskulle	75
7.6	Simuloinnin tulokset	76
7.6.1	Suora salamanisku	76
7.6.2	Takaisku	79
7.7	Tulosten pohdinta	81
8	YHTEENVETO	83
	LÄHDELUETTELO	85
	LIITTEET	91
	Liite 1. Esimerkkitapauksen parametrit	91
	Liite 2. Laskutoimitukset: suora salamanisku	92
	Liite 3. Laskutoimitukset: takaisku	94
	Liite 4. Laskutoimitukset: ylijännitesuojan energianpurkaustarve	95
	Liite 5. Simuloinnissa käytetyt salamaimpulssit	96
	Liite 6. Simuloinnissa käytettyjen salamaimpulssien ajoitus	97

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

*Symbolit*

$C$	Kapasitanssi
$c$	Kapasitanssi pituusyksikköä kohti
$c_0$	Valonnopeus
$c_f$	Kytkenäkerroin
$d$	Etäisyys, pituus
$d_1$	Liitäntäjohtimen pituus
$d_2$	Maadoitusjohtimen pituus
$d_d$	Kahden pisteen välinen suora etäisyys
$d_h$	Kahden pisteen välinen horisontaalinen etäisyys
$d_{\max}$	Maksimi iskuetäisyys
$d_{\text{sag}}$	Rippuma
$f$	Taajuus
$f(U)$	Ylijännitteen tilastollinen todennäköisyys
$g$	Konduktanssi pituusyksikköä kohti
$h$	Korkeus
$h_{\text{avg}}$	Korkeuden keskiarvo
$h_c$	Vaihejohtimen asennuskorkeus
$h_{c, \text{avg}}$	Vaihejohtimen korkeuden keskiarvo
$h_s$	Ukkosjohtimen asennuskorkeus
$h_{s, \text{avg}}$	Ukkosjohtimen korkeuden keskiarvo
$i$	Virran hetkellisarvo
$I$	Virran tehollisarvo
$\hat{i}$	Virran huippuarvo
$I_0$	Virtaimpulssin suuruus
$i_1$	Epäjatkuvuuskohtaan saapuva virta
$I_{1\text{kA}}(t)$	Huippuarvoltaan 1 kA suuruisen virtaimpulssin funktio
$i_2$	Epäjatkuvuuskohdasta jatkava virta
$I_b$	Takaiskuvirta

$I_c$	Kriittinen virta
$I_{c\pm}$	Kriittinen virta, joka huomioi vaihejännitteen huippuarvon
$I_{\max}$	Maksimivirta
$I_{\min}$	Minimivirta
$i_r$	Epäjatkuvuuskohdasta takaisinheijastunut virta
$k$	Elektrodien muodon huomioiva kerroin
$k_1$	Impulssin muotoon vaikuttava parametri
$k_2$	Impulssin muotoon vaikuttava parametri
$K_a$	Korkeuskerroin
$K_c$	Koordinaatiokerroin
$K_{co}$	Koronanvaimennuskerroin
$k_i$	Virtaimpulssin suuruuden korjauskerroin
$K_s$	Varmuuskerroin
$K_t$	Ilmastollinen kerroin
$L$	Induktanssi
$l$	Induktanssi pituusyksikköä kohti
$L_{sp}$	Pylväiden jänneväli
$N$	Suojaan kytkettyjen lähtöjen lukumäärä
$p$	Tehon hetkellisarvo
$P(U)$	Ylilyönnin todennäköisyys
$R$	Vaurioitumisriski
$r$	Resistanssi pituusyksikköä kohti
$r_1$	Johtimen säde
$r_2$	Vaipan sisäsäde
$r_c$	Salaman iskusäde johtimeen
$r_g$	Salaman iskuetäisyys maahan
$R_f$	Pylvään maadoitusresistanssi
$S_I$	Salamaimpulssin virran jyrkkyys
$S_{I,1}$	Ensimmäisen salamaimpulssin virran jyrkkyys
$S_{I,2}$	Seuraavien salamaimpulssien virran jyrkkyys
$S_U$	Salamaimpulssin jännitteen jyrkkyys

$S_{U, b}$	Takaiskun jännitteen jyrkkyys
$t$	Aika
$t_1$	Tarkasteluajan alaraja
$T_1$	Ylijännitteen rinnan nousuaika
$t_2$	Tarkasteluajan yläraja
$T_2$	Ylijännitteen selän puoliarvonaika
$T_{fr}$	Nousevan pulssin kesto aika
$T_l$	Salamaimpulssin kesto aika
$T_p$	Aika ylijännitteen huippuarvoon
$T_r$	Vaimenevan pulssin kesto aika
$T_t$	Ylijännitteen kokonaiskesto aika
$u$	Jännitteen hetkellisarvo
$U$	Jännitteen tehollisarvo
$\hat{u}$	Jännitteen huippuarvo
$u_1$	Epäjatkuvuuskohtaan saapuva jännite
$u_2$	Epäjatkuvuuskohtasta jatkava jännite
$U_b$	Takaiskujännite
$U_c$	Jatkuva käyttöjännite
$U_{cfo}$	Kriittinen ylilyöntijännite
$U_{cw}$	Koordinaatiokestotaso
$U_m$	Laitteen suurin jännite, jolle se on suunniteltu
$\hat{u}_p$	Vaihejännitteen huippuarvo
$U_{pl}$	Salamasyöksyjännitteen suojaustaso
$U_{ps}$	KytKentäylijännitteen suojaustaso
$U_{ptod}$	Todellinen suojaustaso
$u_r$	Epäjatkuvuuskohtasta takaisinheijastunut jännite
$U_r$	Nimellisjännite, nimellinen suojaustaso
$U_{res}$	Ylijännitesuojan jäännösjännite
$U_{rp}$	Jänniterasitusta edustava jännite
$U_{rw}$	Vaadittu jännitteen kestotaso
$U_w$	Ylijännitteen kestotaso

$U_{wl}$	Salamasyöksyjännitteen kestotaso
$U_{ws}$	Kytkenäylijännitteen kestotaso
$v$	Aallon etenemisnopeus
$W$	Energia
$X$	Salamaimpulssin kulkumatka
$Z$	Impedanssi
$Z_1$	Epäjatkuvuuskohdan tulopuolella oleva impedanssi
$Z_2$	Epäjatkuvuuskohdan menopuolella oleva impedanssi
$Z_e$	Ukkosjohtimen aaltoimpedanssi
$Z_l$	Avojohtolinjan aaltoimpedanssi
$\alpha$	Vaimennuskerroin
$\eta$	Huippuarvon korjauskerroin
$\tau_1$	Rinnan nousun aikavakio
$\tau_2$	Selän puoliarvon aikavakio
$\tau_{fr}$	Nousevan pulssin aikavakio
$\tau_r$	Vaimenevan pulssin aikavakio

### *Lyhenteet*

AIS	Air Insulated Switchgear, ilmaeristeinen kojeisto tai kytkinlaite
GIS	Gas Insulated Switchgear, kaasueristeinen kojeisto tai kytkinlaite
IEC	International Electrotechnical Commission, kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio
IEE	Institution of Electrical Engineers, sähköinsinöörien järjestö
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, sähkö- ja elektroniikkainsinöörien järjestö
IET	Institute of Engineering and Technology, insinöörityö ja tekniikan järjestö
LIWV	Lightning Impulse Withstand Voltage, salamasyöksyjännitteen kestoaso



MOV	Metal-Oxide Varistor, metallioksidivaristori
PSCAD	Power System Computer Aided Design, sähköjärjestelmien simulointiohjelma
SF <sub>6</sub>	Sulphur Hexafluoride, rikkiheksafluoridi
SiC	Silicon Carbide, piikarbidi
SIWV	Switching Impulse Withstand Voltage, kytkentäsyökyjänniteen kestotaso
TOV	Temporary Overvoltage, hetkellinen ylijännite
XLPE	Cross-Linked Polyethylene, ristosilloitettu polyeteeni
ZnO	Zinc Oxide, sinkkioksidi

---

**VAASAN YLIOPISTO****Teknillinen tiedekunta**

<b>Tekijä:</b>	Jommi Tervo	
<b>Diplomityön nimi:</b>	Kaasueristeisen sähköaseman ylijännitesuojaus	
<b>Valvoja:</b>	Professori Kimmo Kauhaniemi	
<b>Ohjaaja:</b>	DI Rauno Hirvonen	
<b>Tarkastaja:</b>	Professori Timo Vekara	
<b>Tutkinto:</b>	Diplomi-insinööri	
<b>Oppiaine:</b>	Sähkötekniikka	
<b>Opintojen aloitusvuosi:</b>	2006	
<b>Diplomityön valmistumisvuosi:</b>	2013	<b>Sivumäärä: 97</b>

---

**TIIVISTELMÄ**

Sähkönjakelun ja -siirron solmupisteinä yhä useammin käytetyt kaasueristeiset sähköasemat yleistyvät niiden pienen tilantarpeen ja erinomaisen käyttövarmuuden vuoksi. Kaasueristeisen sähköaseman keskeisenä komponenttina toimiva kaasueristeinen kojeisto (GIS) muodostaa suuren osan koko aseman investointikustannuksista, sillä siihen on keskitetty muun muassa kaikki muutoin erilliset katkaisija- ja erotinlaitteet.

Hyödyistään poiketen kaasueristeinen kojeisto on varsin herkkä ylijännitteille ja aiheuttaa vaurioituessaan pitkän huoltokatkon. Näin ollen kaasueristeisen kojeiston ylijännitesuojauksen optimaalinen määrittäminen on erittäin tärkeää kojeiston pitkän eliniänodotteen saavuttamiseksi. Tavallisesti kysymys on siitä, tarvitaanko sähköasemalle tulevien avojohtolinjojen kaapelipäätteiden yhteydessä olevien ulkoisten ylijännitesuojien lisäksi kojeiston yhteyteen omat kaasueristeiset suojat. Kysymys on investointikustannuksien osalta merkittävä, sillä kaasueristeisen ylijännitesuojan kustannus on noin kymmenkertainen perinteiseen metallioksidisuojaan nähden. Ylijännitesuojien tarpeen määrittämiseksi on lähes poikkeuksetta tehtävä laskenta- ja simulointitarkastelu, johon tässä työssä on annettu eräs menetelmä ja esimerkki.

Tämä diplomityö on tehty ABB Oy:n Power Systems -divisioonaan kuuluvaan Substations -yksikköön. Työn tavoitteena oli kehittää sopiva menetelmä kaasueristeisen sähköasemakojeiston salamapurkauksen ylijännitesuojauksen määrittämiseen erään esimerkkitapauksen avulla.

Laskutoimituksien ja PSCAD-simulointiohjelman tuloksien perusteella voidaan päätellä, että esimerkkitapauksen suojausta ei ole tarvetta tehostaa suoran salamaniskun aiheuttaman ylijännitteen vuoksi. Niin ikään tuloksien perusteella voidaan päätellä, että esimerkkitapauksen suojausta saattaa olla tarve tehostaa takaiskun aiheuttavan ylijännitteen vuoksi. Tällöin on otettava huomioon sähköaseman sijaintialueen ukkostilastot ja lisäksi on syytä tarkastella salamaniskun todennäköisyyksiä kyseisellä paikalla ja kyseisellä kokoonpanolla.

---

**AVAINSANAT:** kaasueristeinen kojeisto, ylijännitesuojaus, PSCAD

---

**UNIVERSITY OF VAASA****Faculty of technology**

**Author:** Jommi Tervo  
**Topic of the Thesis:** Overvoltage Protection of a Gas Insulated Substation  
**Supervisor:** Professor Kimmo Kauhaniemi  
**Instructor:** M.Sc. Rauno Hirvonen  
**Evaluator:** Professor Timo Vekara  
**Degree:** Master of Science in Technology  
**Major of Subject:** Electrical Engineering  
**Year of Entering the University:** 2006  
**Year of Completing the Thesis:** 2013

**Pages: 97**

---

**ABSTRACT**

A substation is the single most important node in electricity transmission and distribution systems. In today's substation configurations gas insulated switchgears (GIS) are favoured due to their minimal space requirements and outstanding reliability. The main component in a gas insulated substation is the gas insulated switchgear, which makes up a large deal of the total investment costs of a substation due to the fact that it holds within for example all the otherwise separate circuit breaker- and disconnector devices.

Apart from the benefits, GIS's are very sensitive to over voltages and once damaged their maintenance times are long. Thus, the optimal determination of the overvoltage protection level and method is extremely important in ensuring the life expectancy of the switchgear. Usually the question is whether additional gas insulated surge arresters are needed in the GIS together with the arresters mounted at the junction of the overhead line and underground cable. Investment-wise the question is vital due to the fact that a gas insulated surge arrester goes for around ten times the price of a traditional metal oxide surge arrester. Thus, in order to solve the problem several calculations and simulations have to be done. This thesis gives an example method for such a study.

This thesis has been done for ABB Oy Substations, a part of the ABB Oy Power Systems division. The purpose of this study was to find and present a clear and understandable method for determining the need for overvoltage protection of GIS's via a real life case-example.

According to the example case calculations and PSCAD simulations, conclusions regarding the example case have been made. There is no need to use additional gas insulated surge arresters to protect against direct lightning strikes. However, in the case of a back flashover, intensifying the overvoltage protection by using additional gas insulated surge arresters at the GIS could be justified. Though, in this case one should further study the lightning statistics and lightning occurrence probabilities of the setup at the current location.

---

**KEYWORDS:** Gas insulated switchgear, Overvoltage protection, PSCAD

## 1 JOHDANTO

Verkossa toimivien komponenttien ylijännitteitä on jo vuosikymmenien ajan rajoitettu erilaisin menetelmin ja suojin. Historian saatossa ylijännitesuojat ovat kehittyneet siten, että aiemmin tyypillisesti käytössä olleet kipinävälisuoja on hyvin pitkälti korvattu kipinävälittömillä suojilla tai näiden hybrideillä. Perinteisesti ylijännitteiltä suojaautuminen toteutetaan suojattavan kohteen rinnalle mahdollisimman lähelle sen napoja asennettavilla ylijännitesuojilla. Käytettävät suojat ja suojausratkaisut riippuvat siitä, miltä ylijännitteiltä halutaan suojautua.

Ylijännitteet voidaan jakaa kahteen ryhmään: pientaajuisiin ylijännitteisiin ja nopeisiin transienttiylijännitteisiin. Transienttiylijännitteitä puolestaan on kolmea eri tyyppiä: loivia, jyrkkiä ja erittäin jyrkkiä. Pääasiassa tässä työssä keskitytään jyrkkiin transienttiylijännitteisiin ja niiden vaikutuksilta suojautumiseen. Ukkonen on tunnetusti jyrkkien transienttiylijännitteiden yleisin aiheuttaja, minkä vuoksi ne tekevätkin suurta tuhoa sekä sähköasemilla että kuluttajilla. Varsinkin ylijännitteille hervät ja yhä nopeammin yleistyvät kaasueristeiset kojeistot on suojattava huolella kaikilta ylijännitteiltä. Sen lisäksi, että kaasueristeinen kojeisto on yksi sähköaseman kalleimmista investoinneista, on se erityisen herkkä jyrkille transienttiylijännitteille ja vaurioituessaan aiheuttaa pitkän huoltokatkon.

Tyypillisesti kaasueristeisen kojeiston ylijännitesuojauksen määrittämisessä on kyse siitä, tarvitaanko päätepylväälle asennettujen ulkoisten ylijännitesuojien lisäksi kojeiston yhteyteen omat investointikustannuksiltaan huomattavasti kalliimmat kaasueristeiset suojat tehostamaan suojausta, sillä usein kojeiston liityntäkaapelin pituuden vuoksi ulkoiset suojat jäävät suojausperiaatteen vastaisesti liian kauas suojattavasta kohteesta. Tässä työssä pyritäänkin esittämään eräs laskentaan ja simulointiin perustuva menetelmä näiden suojien tarpeen selvittämiseksi. Työn tavoitteena on kyseistä menetelmää hyödyntäen arvioida erään kaasueristeisen 110 kV esimerkksisähköaseman ulkoisen ylijännitesuojauksen riittävyttä ja näin ollen saada yksiselitteinen kyllä/ei-vastaus sen kaasueristeisen kojeiston yhteyteen asennettavien ylijännitesuojien tarpeelle.

Empiirisen tutkimuksen suorittamiseen käytetään tietokonepohjaista mallinnus- ja simulointiohjelmaa PSCADia (Power System Computer Aided Design), jolla esimerkiksi tapauksen sähköaseman mallinnus ja salamaimpulssien simulointi onnistuu. Työssä on simuloitu neljä eri suoran salamaniskun ja kolme eri takaiskun tapausta, joiden kojeistoon aiheuttamia ylijännitteitä verrataan kojeistovalmistajan ilmoittamaan ylijännitteen kestotasoon, minkä perusteella kaasueristeisien ylijännitesuojien tarvetta arvioidaan.

Työn alussa oleva teoriaosuus puolestaan muodostuu aiheeseen ja teoriataustaan liittyvästä kirjallisuusselvityksestä, johon käytetään eri aikakausien painettua kirjallisuutta, standardeja, artikkeleita ja ylijännitesuojien toimittajien lähteitä (artikkelit, käyttö- ja asennusohjeet). Teoriaosuudessa käsitellään kaasueristeistä GIS-kojeistoa (Gas Insulated Switchgear), ylijännitteitä ja niiden syntyä sekä kulkua, eristyskoordinaatiota, ylijännitteiden rajoittamista sekä ylijännitesuojan valintaa.

ABB Oy Sähköasemien kannalta projektien laskenta-, tarjous- ja toteutusvaiheessa olisi hyötyä selkeästä ylijännitesuojien määrittämiseen tarkoitetusta laskenta- tai simulointimenetelmästä. Myös sähköasemaprojektien kaupankäynnin kannalta on edullista tietää GIS-kojeiston yhteyteen asennettavien kaasueristeisin ylijännitesuojien tarpeesta ulkoisten ylijännitesuojien lisäksi. Mahdollisia GIS-asemakokonaisuuksia tarjottaessa, tarpeettomien ja investointikustannuksiltaan kalliiden suojien poisjättämisellä voi olla selvä etu hintakilpailussa.

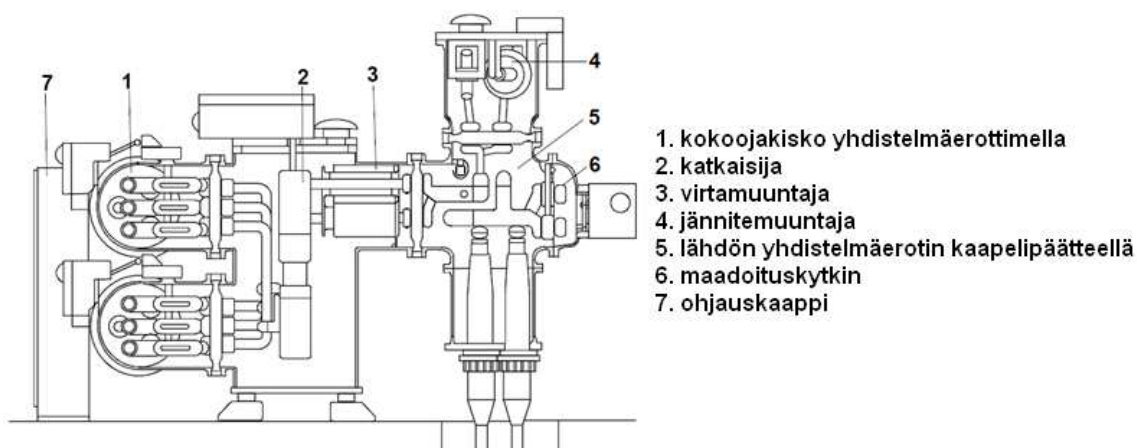
## 2 KAASUERISTEINEN SÄHKÖASEMAKOJEISTO

Sähköasema mielletään sähköverkon tärkeimmäksi solmukohdaksi. Sitä tarvitaan muun muassa sähkön laadun ylläpitämiseen ja siirtohäviöiden minimoimiseen. Sähköasema on siirto- tai jakeluverkon kohta, jossa voidaan muuntaa jännitettä tai muuttaa verkon kytkentää. Niinpä sähköasema voidaan luokitella tehtävänsä perusteella joko jakelu-, kytkin- tai muuntoasemaksi, tai näiden hybridiksi. (Elovaara & Haarla 2011: 76, Haveri 2006: 4.)

Sähköaseman tärkeimpiin laitteisiin luetaan muun muassa muuntaja, katkaisijat, erottimet sekä kompensointi- ja mittalaitteet. Tärkeimpien laitteiden lisäksi asemalla on käytössä lukuisia erilaisia kojeita ja komponentteja. Monesti tilan säästämiseksi, asennuksen ja käyttöönoton yksinkertaistamiseksi sekä standardiratkaisujen tarjoamiseksi, sähköasemilla käytetään sähköasemakojeistoja, joiden sisälle on koottu suurin osa aseman keskeisimmistä laitteista. (IEC 62271-205: 6 - 7.) Kojestot ovat tyypillisesti ilma- tai kaasueristeisiä, riippuen jännitetasosta.

Kaasueristeisien laitteiden kuten muuntajien, katkaisijoiden ja kojeistojen käyttö sähköasemilla on yleistynyt lähinnä ympäristö- ja tilansäästösyistä mutta myös niiden vaivattoman asennuksen ja käytön vuoksi. Turvallisuusnäkökulmasta kaasueristeisien laitteiden ja etenkin kaasueristeisien kojeistojen käyttö on varsin suosittua maanalaisissa asennuksissa ja asutuskeskuksien välittömässä läheisyydessä olevilla sähköasemilla niiden pienen tulipalo- ja räjähdysvaaran vuoksi.

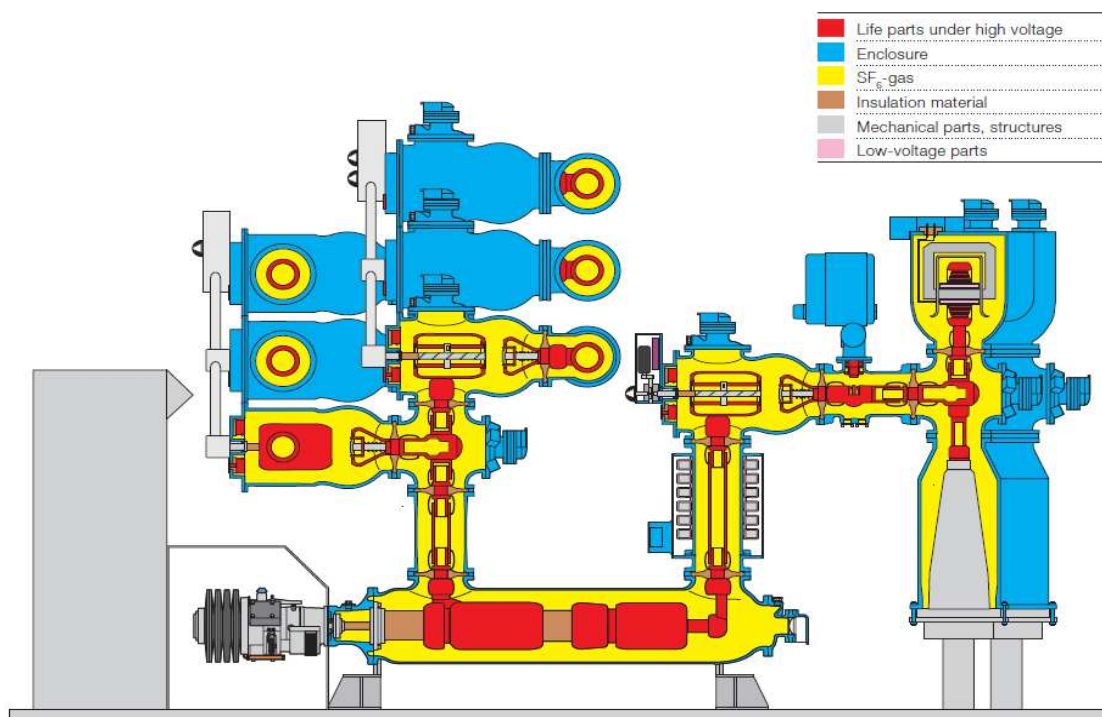
Kuva 1 esittää kaasueristeistä kojeistoa, jossa laitoksen jännitteelliset osat, kuten kokoojakiskot, erottimet, katkaisijat, mittamuuntajat, kaapelipäätteet ja yhdysosat, on sijoitettu eristekaasulla täytettyihin hermeettisesti suljettuihin maadoitettuihin koteloihin (IEC 62271-203: 23 - 25). Kaasueristeisiä GIS-kojeistoja on ollut käytössä 1960-luvulta lähtien. Niiden käyttö ulottuu reilusta kymmenestä kilovoltista aina 800 kV asti oikosulkukestoisuuden noustessa jopa 100 kA saakka ja mitoitusvirran ollessa väliltä 630 ja 8000 A (ABB 2000: 345; ABB 2006; Elovaara & Haarla 2011: 128). Nyttemmin suurimmat valmistajat tarjoavat GIS-kojeistoja jo megavolttiluokkaan.



**Kuva 1.** GIS-kojeiston kytkinkentän poikkileikkauskuva (ABB 2000: 348).

Kaasueristeisellä kojeistolla on monia hyviä puolia, jotka edistävät niiden yleistymistä sähköjakelussa. Näistä tärkeimpinä pidetään pientä tilantarvetta ja erinomaista käyttövarmuutta. Pinta-alaan katsottuna tilansäästö perinteiseen ilmaeristeiseen AIS-laitokseen (Air Insulated Switchgear) verrattuna on moninkertainen. Muita kaasueristeisen sähköaseman tunnusomaisia etuja ovat alhainen huollontarve, pitkä käyttöikä, kevyt rakenne ja lyhyt asennusaika ja varma kosketussuoja. Valmistajasta riippuen GIS-kojeistot ovat kolmivaiheisesti koteloituja 123 - 170 kV jännitehaarukkaan saakka, tätä suuremmilla jännitteillä kotelointi tapahtuu yksivaiheisesti. (ABB 2000: 345; ABB 2006: 499; Aro ym. 2003: 166, Elovaara & Haarla 2011: 131.)

Kuvassa 2 on esitettynä poikkileikkauskuva hyvin yleisesti käytössä olevasta GIS-kojeistosta. Kuvasta nähdään kuinka kaasu (keltainen) on lokeroituna kojeiston eri osiin läpivientitukieristimin (ruskea), jotka samalla tukevat ja pitävät jännitteelliset osat (punainen) koteloiden (sininen) sisällä konsentrisesti. Laitoksen jako erillisiin kaasutiloihin helpottaa ja nopeuttaa huoltoa ja pienentää vikojen vaikutusaluetta ja leviämistä (IEC 62271-203: 21). Suurjännite-GIS-kojeistoissa kiskot, katkaisijat, erottimet, mitta- ja muuntajaliittynät ovat tavallisesti omissa osastoissaan. (ABB 2011a: 4; Elovaara & Haarla 2011: 129.)

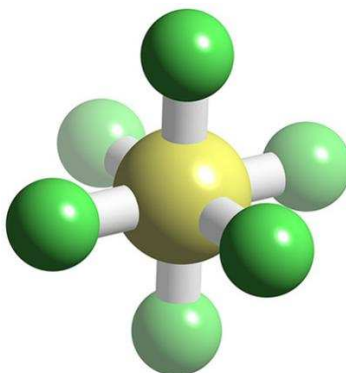


**Kuva 2.** GIS-kojeiston jako kaasutiloihin (ABB 2011a: 4).

Kaasueristeisen kojeiston tai laitteen kaasunpaine on tavallisesti normaalia ilmanpainetta suurempi, jotta kaasun jännitelujuus saataisiin mahdollisimman suureksi. Tosin paineen nostaminen on suotavaa koteloinnin ja tiiviyn puitteissa vain tiettyyn rajaan saakka, sillä suurilla paineilla kaasulla on vaarana nesteytyä lämpötilan laskiessa riittävästi. Lämpötilan ja samalla kaasun paineen laskiessa kohti nesteytymisrajaa, on laitteilla kuten katkaisijoilla vaarana mennä lukitustilaan, jolloin niiden käyttö on estetty laitteen suojaamisen vuoksi. Kylmillä alueilla suositellaankin käytettäväksi seoskaasuja, joilla on mahdollista laskea kaasun nesteytymisrajaa. (ABB 2006: 500; Aro ym. 2003: 105.)

Jo vuodesta 1960 lähtien kaasueristeisien laitteiden yleisimpänä eristeaineena on käytetty rikkiheksafluoridikaasua ( $\text{SF}_6$ ). Se on ihmisen kehittämä synteettinen, väritön, hajuton, myrkytön ja palamaton kaasu, joka koostuu kuudesta rikkiatomin ympärille ryhmittyneistä fluoriatomeista, kuvan 3 mukaisesti. Tunnetusti rikin ja fluorin välinen kemiallinen side on eräs lujimmista. (IEC 62271-303: 47.)



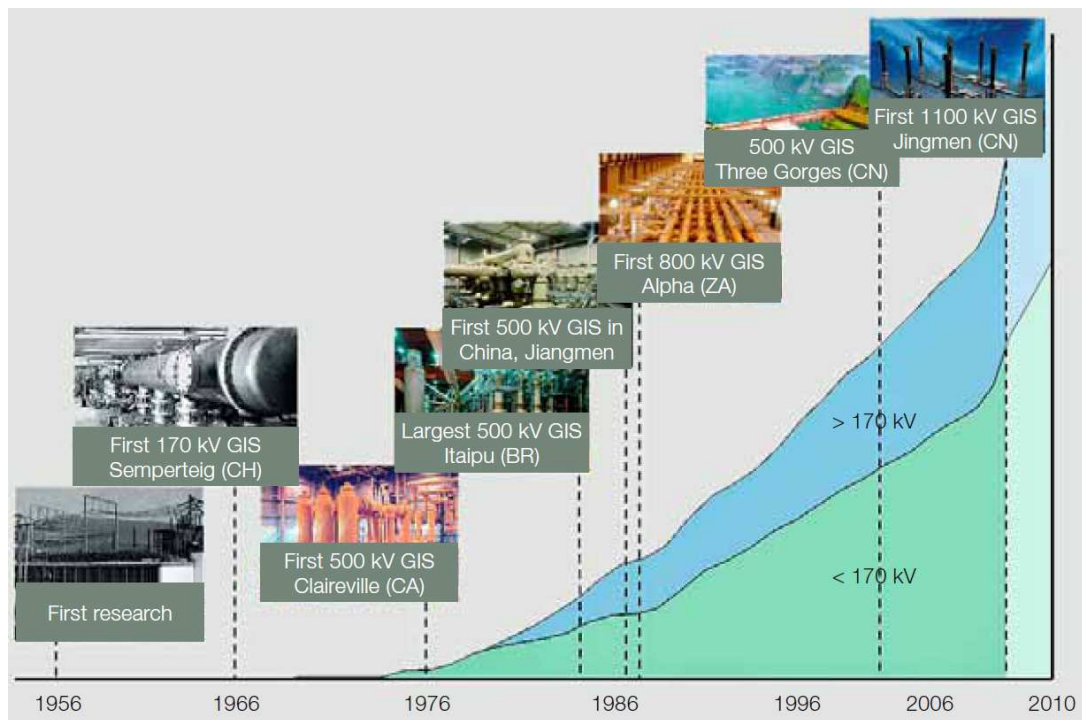


**Kuva 3.** SF<sub>6</sub>-molekyyli (3Dchem.com).

SF<sub>6</sub>-kaasun sähköiset ominaisuudet ovat lyömättömät. Se on vahvasti elektronegatiivinen, eli se vetää puoleensa vapaita elektroneja ja täten muodostaa painavia ioneja, joiden liikkuvuus on rajallinen ja täten elektronivyöryn syntyminen epätodennäköisempää (IEC 62271-303: 49). Sen ominaisuudet ovat vailla vertaa; sillä on korkea läpilyöntilujuus (noin kolminkertainen ilmaan nähden), hyvä valokaaren sammutuskyky (noin kymmenkertainen ilmaan nähden) ja hyvät lämmönsiirto-ominaisuudet (noin kaksinkertaiset ilmaan nähden) (IEC 60376: 13). Toistaiseksi SF<sub>6</sub>-kaasulle ei ole pystytty kehittämään vastaavia ominaisuuksia omaavaa korvaavaa kaasua. Lisäksi kaasun valmistusprosessi on yksinkertainen ja täten myös verrattain edullinen. Kaasun tullessa käyttöikänsä päähän, kun siis sen puhdistaminen ei ole enää teknisesti mahdollista tai taloudellisesti kannattavaa, se voidaan hävittää polttamalla. (IEC 60480: 11, 19.)

## 2.1 GIS:n historia

ABB on toiminut pioneerinä GIS-tekniikan kehittämisessä koko sen historian ajan aina SF<sub>6</sub>-kaasun ensimmäisistä tutkimuksista 1950-luvun puolivälistä tämän päivän megavolttiluokan kaasueristeisen kojeiston kehittämiseen. Kuvassa 4 on kuvattu ABB:n historiaa GIS-kojeistojen toimittajana. Nähdään, että ensimmäiset kaupalliset GIS-kojeistot tulivat markkinoille jo vuonna 1966, noin 10 vuotta sopivan eristekaasun (SF<sub>6</sub>) löytämisen jälkeen. (ABB 2009: 2.) Kuvasta 4 nähdään kuinka GIS-kojeistojen suosio ja jännitetasot ovat kasvaneet historian saatossa.



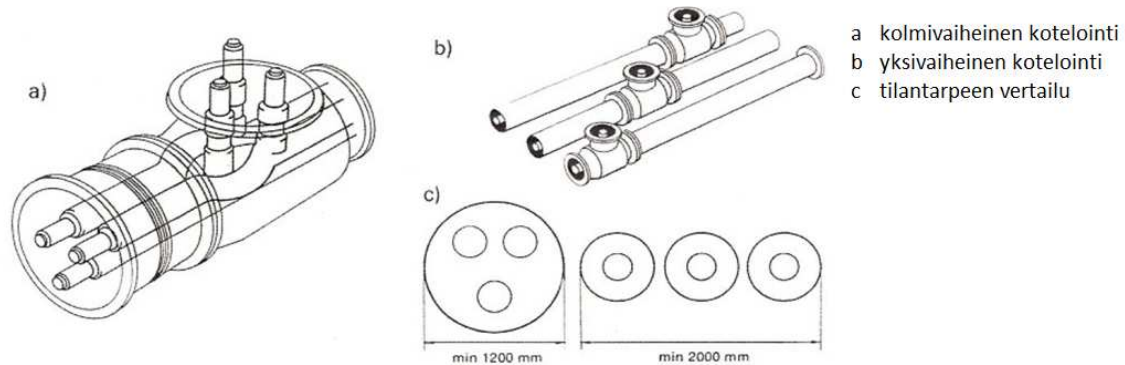
**Kuva 4.** ABB:n historia GIS-toimittajana (Holaus & Stucki 2008: 21).

Vuonna 1966 ABB toimitti ensimmäisen 170 kV GIS-kojeiston Sveitsin Zurichiin, vuonna 1976 ensimmäisen 500 kV kojeiston Kanadan Clairvilleen ja vuonna 1986 ensimmäisen 800 kV kojeiston Etelä-Afrikkaan. Viimeksi mainittu on toiminut yli 20 vuotta ilman häiriöitä tai suunnittelemattomia katkoja. Tänä päivänä suurin GIS-kojeisto sijaitsee Kiinassa Kolmen rotkon pato -vesivoimalan yhteydessä. Ensimmäinen megavolttiluokan kojeisto on ABB:n ja Xian Shikyn yhteistyön tulos vuodelta 2008. Tämä ABB:n ELK-5 on käytössä niin ikään Kiinassa Jingmenin kaupungissa. (Holaus & Stucki 2008: 21 - 24.)

## 2.2 GIS-laitosten kotelointiperiaatteet

Kuvassa 5 on esitettyä GIS-laitosten kotelointiperiaatteet. Kolmivaiheisen koteloinnin etuina on vähäisempi liitoksien tarve ja täten pienempi todennäköisyys kaasuvuodoille. Kolmivaiheinen kotelointi säästää tilaa ja on edullisempi yksivaiheiseen kotelointiin

verrattuna. Lisäksi yksivaiheisen koteloinnin mahdollinen läpipalaminen kolmivaiheisen vian aikana aikaansaa vaaratilanteen. (Elovaara & Haarla 2011: 131 - 132.)



**Kuva 5.** GIS-laitosten kotelointiperiaatteet (Elovaara & Haarla 2011: 131).

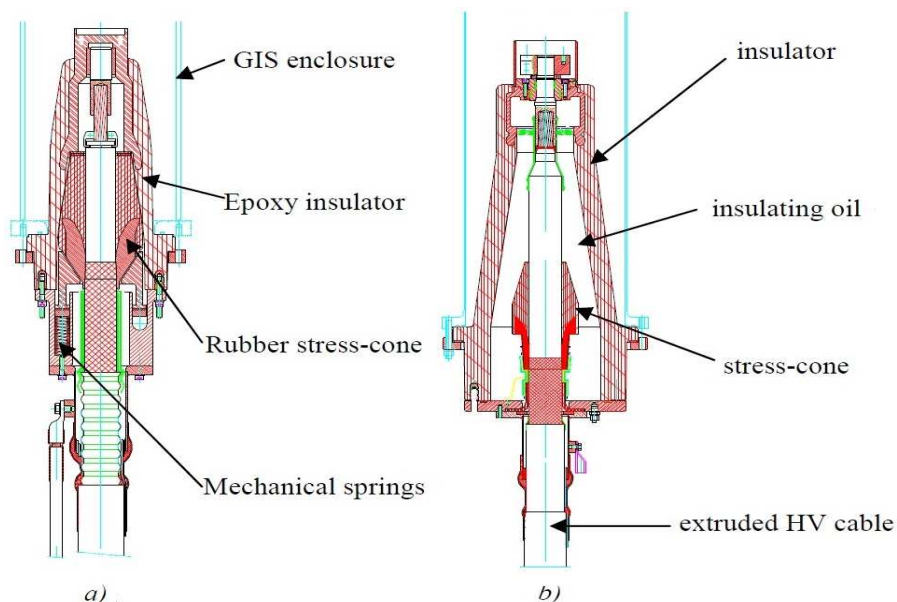
Kolmivaiheisessa koteloinnissa voidaan käyttää teräsvaippaa, sillä pyörrevirtoja ei niiden kumoutumisen vuoksi pääse syntymään kuten yksivaiheisella koteloinnilla, jolloin indusoituvien virtojen vuoksi vaippamateriaalina on käytettävä esimerkiksi alumiinia. Sekä yksi- että kolmivaiheiset kotelot varustetaan paineenpurkausluukuilla valokaarivikojen aiheuttaman räjähdysvaaran varalle. (Elovaara & Haarla 2011: 131 - 132.)

### 2.3 GIS-kojeistoon liittyminen

Kaasueristeisen kojeiston liittäminen verkkoon on aina haastavaa. Kojeistoon voidaan liittyä kolmella eri tapaa; avojohdolla, kaapelilla tai koteloidulla liittynällä. Tyypillisimmin käytössä oleva kaapeliliityntä on kaasueristeiselle laitokselle parhaiten sopiva. Ilmajohtoon nähden kaapelien käyttö antaa vapauksia aseman rakenteen suunnittelussa ja tilankäytön kysymyksissä. Tosin kaapelien kuormitettavuus ja investointikustannukset saattavat muodostua rajoituksiksi. (Elovaara & Haarla 2011: 133.)

Kaapeliliityntä kaasueristeiseen kojeistoon vaatii aina kaapelipäätteen, tehtiinpä se sisä- tai ulkotiloissa. Läpivientieristimen tehtävänä on pitää eristysaineet, kuten ilma ja kaasu, erillään toisistaan säilyttäen kojeiston kaasutiiviys. Läpivientieristimiä on tarjolla käytännössä kahta päätyyppiä: perinteisiä öljy- tai kaasutäytteisiä päätteitä ja vasta

hiljattain pidemmälle jalostettuja kuivia päätteitä. (IEC 62271-209: 6). Kuvassa 6 on esitettynä erään valmistajan läpileikkaukset erityyppisistä sisäkäyttöön tarkoitetusta kaapelipääteistä.



**Kuva 6.** Eräiden GIS-kojeistoihin tarkoitettujen kaapelipääteiden läpileikkaukset: kuiva kaapelipääte (a), öljyeristeinen kaapelipääte (b) (Pascal: 2 - 3).

Öljyeristeiset kaapelipäätteet ovat historian saatossa olleet perinteinen vaihtoehto kaapelin läpivientiin niiden hyvän mukautumisen ja joustavuuden vuoksi (Pascal: 1). Kuivien kaapelipääteiden eduksi puolestaan nousee palavan materiaalin puuttuminen ja täten pienempi koko, nopeampi asennus sekä vähäinen huollon- ja seurannantarve. (Pascal: 2 - 3.)

Ylijännitteiden ja niiltä suojautumisen osalta on muistettava, että useat sarjassa olevat liittynät ja päätteet vaikeuttavat ylijännitteiden laskentaa. Muun muassa liittynöissä tapahtuvat jänniteaaltojen heijastukset ja vaimenemiset on tällöin laskettava ja simuloitava entistä huolellisemmin ylijännitesuojausta suunniteltaessa. (Elovaara & Haarla 2011: 133.)

### 3 YLIJÄNNITTEET

Ylijännitteeksi määritellään jännite, joka ylittää tarkastelussa olevalle eristysrakenteelle ominaisen referenssiarvon. Ylijännitteet voidaan jakaa kahteen ryhmään, pientaajuisiin ylijännitteisiin ja lyhytaikaisiin ylijännitteisiin. Lyhytaikaisten ylijännitteiden osalta referenssiarvot ylittyvät, kun vaiheen ja maan välisessä eristyksessä vaikuttava jännite ylittää arvon  $U_m\sqrt{2}/\sqrt{3}$  (eli 1 p.u.) tai vaihevälieristyksen tapauksessa, kun jännite ylittää arvon  $U_m\sqrt{2}$ , joissa  $U_m$  on laitteen suurin käyttöjännite, jolle sen on suunniteltu. (Aro ym. 2003: 243; Elovaara & Haarla 2011: 11.)

#### 3.1 Ylijännitteiden synty ja luokittelu

Ylijännitteet ovat tavallisimmin lähtöisin verkossa tapahtuneesta kuormitusmuutoksesta, kytkentä- tai erotustapahtumasta, viasta tai salamaniskusta. Lyhytaikaiset transienttiylijännitteet voidaan jakaa muun muassa pulssin amplitudin, sekä kesto- ja nousuaikojen suhteen loiviksi, jyrkiksi ja erittäin jyrkiksi transienttiylijännitteiksi. Tämän työn empiirisessä osuudessa keskitytään pääasiassa ylijännitteistä vakavimpaan, ukkosen aiheuttamaan salamapurkaukseen, eli jyrkkään transienttiylijännitteeseen ja sen vaikutuksilta suojautumiseen.

Kuvasta 7 nähdään kuinka voimakkaasti vaimenevat, lyhytaikaiset transienttiylijännitteet poikkeavat huomattavasti heikosti vaimenevista, pientaajuisista ylijännitteistä. Transienttiylijännitteiden jänniterasituksen kesto aika on enintään millisekunteja kun taas pientaajuiset ylijännitteet voivat kestää huomattavan kauan. Pientaajuisille ylijännitteille on ominaista verrattain pitkän kestoajan lisäksi jaksollinen jännitteen muoto. (Aro ym. 2003: 243 - 244; Elovaara & Haarla 2011: 11 - 12.)

Kullekin ylijännitetyypille on määritetty oma IEC 60071 -standardin mukainen koejännite sen luonteenpiirteiden mukaan. Koejännitteet näkyvät kuvassa 7. Niitä käytetään muun muassa kojeiden ja laitteiden jännitelujuustarkastelussa. Erittäin jyrkille transienttiylijännitteille ei ole vielä määritetty standardipulssia vaan se sovitaan tapaus-

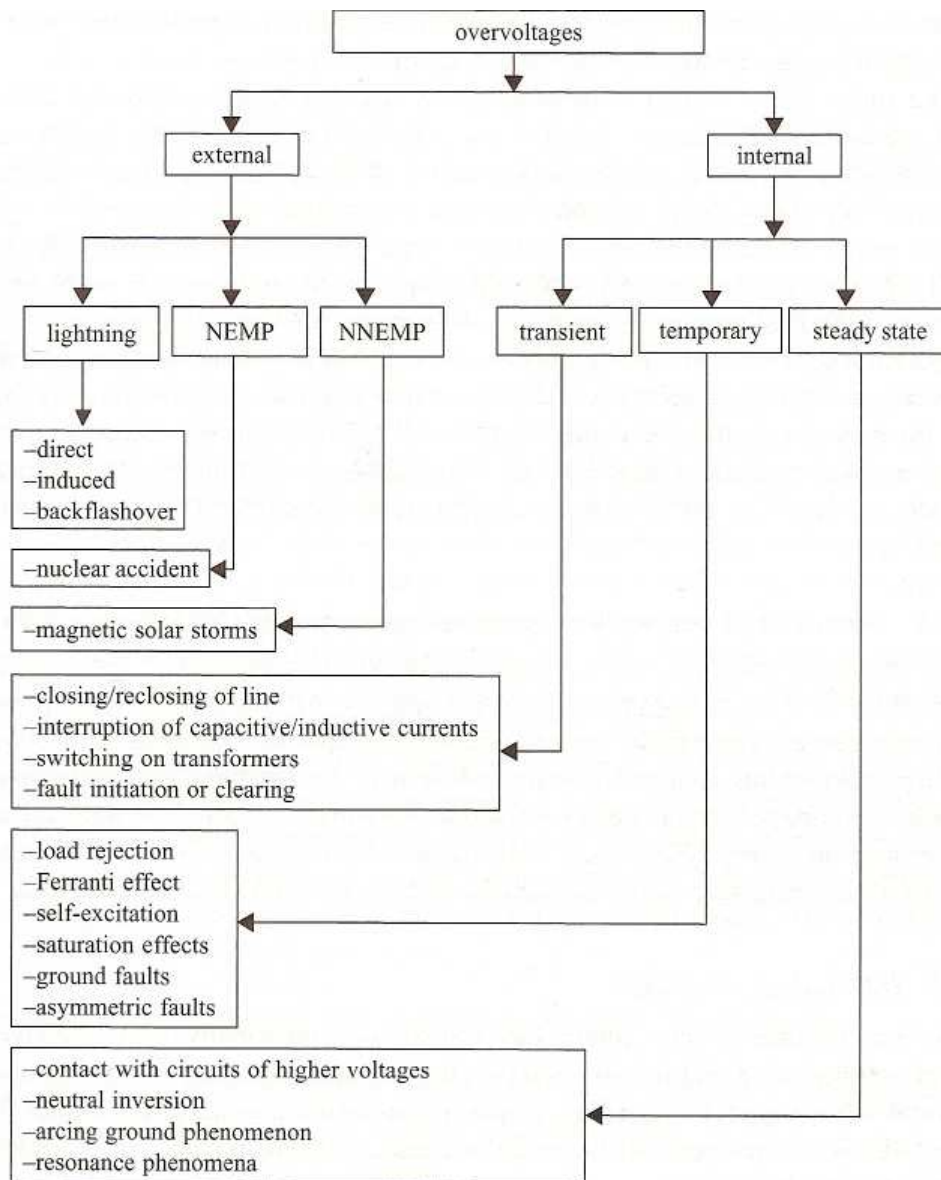
kohtaisesti. Niiden rinnan nousuaika on joka tapauksessa vain nanosekuntien luokkaa. (Elovaara & Haarla 2011: 12.)

Class	Low frequency		Transient		
	Continuous	Temporary	Slow-front	Fast-front	Very-fast-front
Voltage or over-voltage shapes					
Range of voltage or over-voltage shapes	$f = 50 \text{ Hz}$ or $60 \text{ Hz}$ $T_t \geq 3 \text{ 600 s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,02 \text{ s} \leq T_t \leq 3 \text{ 600 s}$	$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5 \text{ 000 } \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$T_f \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$
Standard voltage shapes	 $f = 50 \text{ Hz}$ or $60 \text{ Hz}$ $T_t^a$	 $48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_t = 60 \text{ s}$	 $T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2 \text{ 500 } \mu\text{s}$	 $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	a
Standard withstand voltage test	a	Short-duration power frequency test	Switching impulse test	Lightning impulse test	a

<sup>a</sup> To be specified by the relevant apparatus committees.

**Kuva 7.** Ylijännitetyypit ja niiden standardoidut koejännitemuodot (IEC 60071-1: 17).

Kuvassa 8 on esitetty vanha ylijännitteiden kategorisointi syntytyperän mukaan, sisäisiin ja ulkoisiin tekijöihin. Verkon ulkopuolelta peräisin olevat ylijännitteet ovat joko ukonilman tai sähkömagneettisen pulssin aiheuttamia. Sisäiset ylijännitteet ovat järjestelmän itsensä aiheuttamia, viasta, kytkentätoimenpiteestä tai sähköisestä ilmiöstä johtuvia. Erona sisäisten ja ulkoisten tekijöiden välillä on se, että sisäiset ylijännitte-tekijät määräytyvät järjestelmän rakenteesta, asettelusta ja parametreista, kun taas ulkoisiin tekijöihin näillä ei ole vaikutusta. (Elovaara & Haarla 2011: 13; German & Haddad 2004: 312, 314.)



**Kuva 8.** Ylijännitteiden syntyperiä (German & Haddad 2004: 313).

Yleisimmin ylijännitteet johtuvat joko ulkoisesta salamaniskusta tai sisäisestä kytkentätoimenpiteestä. Ulkoiset tekijät aiheuttavat pääasiassa jyrkkiä transienttiylijännitteitä salamaniskujen johdosta. Sisäiset tekijät voivat aiheuttaa mitä tahansa ylijännitteitä aina pientaajuisista resonanssitilanteista erittäin jyrkkiin SF<sub>6</sub>-katkaisijatapahtumista peräisin oleviin transienttiylijännitteisiin. Aiheuttajaperusteisesta luokittelusta on luovuttu sen huonon kuvaavuuden ja korrelaation vuoksi. Nykyään luokittelu tehdään loogisesti ylijännitetyyppin mukaisesti. (Elovaara & Haarla 2011: 13; German & Haddad 2004: 313.)

### 3.1.1 Pientaajuiset ylijännitteet

Pientaajuisten ylijännitteiden aiheuttajia on lukuisia, näitä ovat muun muassa maasulut, kuorman äkillinen poiskytkeminen, resonanssit ja ferroresonanssit, Ferranti-ilmiö, epälineaariset komponentit ja laitteet sekä generaattorien itseherätys (Aro ym. 2003: 245; Elovaara & Haarla 2011: 13). Pientaajuiset ylijännitteet voivat vaikuttaa verkossa muutamista sekunneista useisiin tunteihin. Järjestelmälle ja sen laitteiden eristyksille pientaajuiset ylijännitteet ovat kuitenkin melko vaarattomia sillä tyypillisesti niiden amplitudi pysyy alle  $\sqrt{3}$  p.u. Toisaalta ylijännitesuojien valinnan kannalta niiden kestolla ja amplitudilla on vaikutusta. (ABB 2011b: 7.)

### 3.1.2 Loivat transienttiylijännitteet

Kuten pientaajuiset ylijännitteet, myös loivat transienttiylijännitteet syntyvät tavallisimmin kytkentäoperaatioiden tai verkon tilan muutoksen seurauksena. Verkon tila voi muuttua joko vian, kuten oiko- tai maasulun, kuorman irtikytkemisen tai epätahtitilanteen seurauksena (Aro ym. 2003: 264). Usein katkaisijan käyttö virtapiirien avaamiseen tai sulkemiseen aiheuttaa sekä loivia transienttiylijännitteitä että pientaajuisia ylijännitteitä. Näissä tapauksissa transienttien vaimennuttua verkkoon voi vielä jäädä pientaajuinen ylijännite. (Elovaara & Haarla 2011: 19.)

### 3.1.3 Jyrkät transienttiylijännitteet

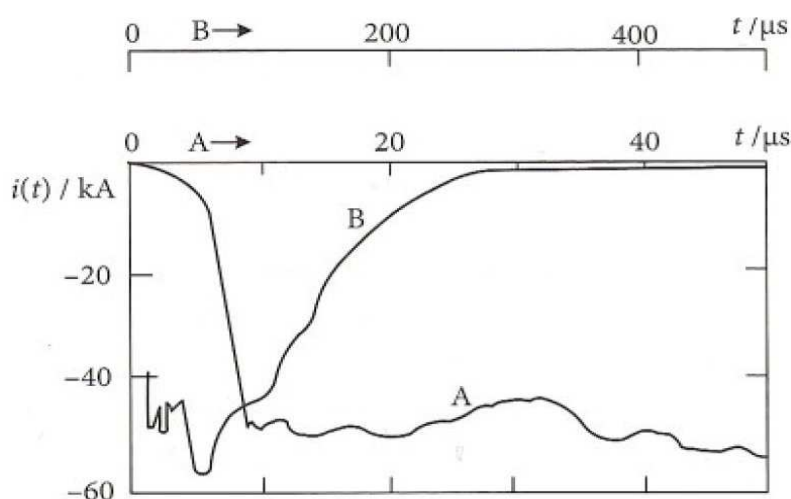
Jyrkät transienttiylijännitteet ovat lähes aina ukkospurkauksen aiheuttamia, minkä vuoksi niitä onkin aiemmin nimitetty ilmastollisiksi ylijännitteiksi. Ne aiheuttavat suuren osan sähköverkkokokonaisuudessa tapahtuvista ylijännitevaurioista, joilla on usein laaja vaikutus järjestelmään. Esimerkiksi Saksan Neumarktissa ukonilman aiheuttaman salamaiskun ylijännitteet räjäyttivät yhden 110/20 kV sähköaseman päämuuntajan ja lopulta pimensivät koko kaupungin vuonna 1983 (Hasse 2003: 24 - 27).

Jyrkät transienttiylijännitteet voivat syntyä verkkoon joko induktion kautta, kun salama osuu verkon välittömään läheisyyteen, suoran salamaniskun kautta, kun salama osuu suoraan jännitteeseen osaan, tai takaiskun kautta, kun salama osuu johonkin verkon



jännitteettömään osaan (IEC 60071-2: 47). Noin 80 % avojohdolle osuvista salamaniskuista osuu kuitenkin joko pylvälle tai sen läheisyyteen (Aro ym. 2003: 285).

Kuvassa 9 on esitetty tyypillinen salamavirtaoskillogrammi. Salaman rintaosa, eli sen alku, on muodoltaan kovera ja kestoltaan noin muutaman mikrosekunnin luokkaa. Pulssin suurin jyrkkyys saavutetaan virran huippuarvon lähetyvillä. Tätä seuraa kestoltaan noin muutamien kymmenien mikrosekuntien pituinen suuramplitudinen osa, jota seuraa verrattain pitkään vaikuttava pienivirtainen osa (Elovaara & Haarla 2011: 24 - 25). Amplitudiltaan salamavirta on tyypillisesti muutama kymmenen kiloampeeria, 3 - 20 kA suorille salamaniskuille ja yli 20 kA takaiskuille (Aro ym. 2003: 280).



**Kuva 9.** Tyypillinen salamavirtaoskillogrammi, käyrä A on suurennos käyrän B alkuosasta (Elovaara & Haarla 2011: 25).

Indusoitunut jyrkkä ylijännitetransientti syntyy, kun salama iskee pylväiden välittömään läheisyyteen. Sen amplitudi on suoraan verrannollinen johtimien asennuskorkeuteen ja salamavirtaan, mutta samanaikaisesti kääntäen verrannollinen johdon ja iskukohdan väliseen etäisyyteen. Indusoitunut ylijännite aiheutuu pääpurkausvirran sähkömagneettisesta induktiosta ja tyypillisesti se aiheuttaa suurimmillaankin alle 400 kV ylijännitteen avojohdolle (IEC 60071-2: 47). Tästä verrattain pienestä ylijänniteamplitudista johtuen, indusoituneet ylijännitteet ovat vaarallisia lähinnä vain keskijänniteverkoissa, joissa yli 10 p.u. ylijännitteet ovat mahdollisia (ABB 2011b: 7). (Aro ym. 2003: 292; Elovaara & Haarla 2011.)

Takaisku puolestaan muodostuu, kun johdon maadoitettuun osaan, kuten pylvääseen tai ukkosjohtimeen osuu salamanisku. Pylvästä pitkin maahan kulkeutuva virta aiheuttaa pylvään ja maadoituksen impedansseissa jännitehäviön, joka puolestaan nostaa pylvään potentiaalia. Pääsääntöisesti pylvääseen osuva isku aikaansaa eristimien jännitetasituksen kannalta pahemman tilanteen kuin ukkosjohtimeen osuva isku. Tämän vuoksi pelkkä pylvääseen osuvan iskun tarkastelu yleensä riittää. (Aro ym. 2003: 285; Elovaara & Haarla 2011: 26.)

Takaiskusta aiheutuvan ylijännitteen suuruuteen vaikuttaa muun muassa pylvään aaltoimpedanssi, pylväsmaadoituksen aalto- ja maadoitusvastukset sekä avojohtoteristuksen jännitelujuus. Näiden lisäksi jännitetasituksen suuruuteen vaikuttaa johtojen sähköinen kytkentä, johdoilla ja maadoituselektrodeissa tapahtuva ionisaatio sekä salamavirran jakautuminen eri kulkureiteille pylväillä, haruksissa ja johtimissa. Tämän vuoksi takaiskun aiheuttamia ylijännitteitä on mahdollista kuvata ja laskea lähinnä vain tietokoneohjelmilla. (Aro ym. 2003: 285 - 292; Elovaara & Haarla 2011: 26 - 27.)

Suorat salamaniskut sen sijaan voivat aiheuttaa jopa megavolttien suuruisia ylijännitteitä, jolloin ylilyöntiä ja täten maasulkua on lähes mahdoton välttää. Suorassa vaihejohtimeen kohdistuvassa salamaniskussa salamavirta jakaantuu puoliksi, johdon molempiin suuntiin eteneviin kulkuaaltoihin

$$u = \frac{1}{2} Z \cdot i, \quad (1)$$

missä  $u$  on syntyvän ylijänniteaallon suuruus,  $Z$  on aaltoimpedanssi ja  $i$  on salamavirta (Aro ym. 2003: 285).

Jos salamaniskun virraksi oletetaan esim. 20 kA ja johdon aaltoimpedanssiksi 450  $\Omega$ , saadaan ylijännitteen suuruudeksi noin 4,5 MV, joka on noin 3,5-kertainen Suomessa suurimpaan käytössä olevaan jännitetasoon. Nämä ylijännitteet on otettava huomioon suojausta suunniteltaessa. Avojohton aaltoimpedanssi on tyypillisesti jotain väliltä 250 - 500  $\Omega$ . Ylijännitettä vaimentavia ja rajoittavia tekijöitä ovat johdon jännitelujuus, korona sekä johtimessa ja maapiirissä tapahtuvat häviöt. (Aro ym. 2003: 285; Elovaara & Haarla 2011: 25.)

Vaikka vuosikymmenien saatossa suojausmenetelmät ovat kehittyneet, ovat ukonilman aiheuttamat ylijännitteet edelleen suuri huolenaihe, varsinkin maissa, joissa ukkostiheys on korkea. Suomessa ukkostiheys on suhteellisen pieni, sillä sijaitsemme ilmastovyöhykkeellä, jossa ukkostiheys on noin 0,1 - 1,5 iskua per 100 km<sup>2</sup> per vuosi. Vanhoihin kuulohavaintoihin perustuvien keraunisten karttojen perusteella ukkostiheys Suomessa on karkeasti noin kahdeskymmenesosa kaikista ukkosrikkaimpiin, päiväntasaajan lähistöllä sijaitseviin maihin nähden. (Aro ym. 2003: 283; Elovaara & Haarla 2011: 23.)

### 3.1.4 Erittäin jyrkät transienttiylijännitteet

Verkossa esiintyvät erittäin jyrkät transienttiylijännitteet johtuvat lähinnä SF<sub>6</sub>-eristeisien erottimien käytöstä, jolloin erottimen avaustoiminnon aikana muodostuneet kymmenet valokaaren jälleensyttymiset generoivat kukin suurtaajuuden värähtelyn RLC-piirillä kuvattavaan verkkoon (Elovaara & Haarla 2011: 13). Korkeilla taajuuksilla GIS-kojeiston ulkokuori toimii aaltoputken tavoin, mikä mahdollistaa transientin siirtymisen hyvinkin pitkälle syntypaikastaan ilman merkittävää vaimennusta. Syntyvät jännite-transientit ovat lisäksi suurempitaajuisia kuin ilmaeristeisien AIS-laitteiden vastaavat, ja niiden purkausvirtojen suuruus voi olla jopa 2 - 3 kA. (Aro ym. 2003: 302.)

## 3.2 Ylijännitteiden kulku

Nopeasti kasvavat ylijännitteet etenevät verkkoon kulkuaaltoina (syöksyaaltoina). Paikoissa, joissa verkon aaltoimpedanssi muuttuu, tapahtuu kulkuaallon heijastumista ja taittumista materiaalien ominaisuuksien mukaisesti. Kulkevasta aallosta heijastuva ja läpipääsevä osuus riippuu materiaalien aaltoimpedansseista. Esimerkiksi johdon avoimesta päästä, jossa aaltoimpedanssi on käytännössä ääretön, takaisin heijastuu käytännössä koko aalto. Esimerkin kaltaisessa tilanteessa takaisin heijastunut aalto superponoituu tulevan aallon kanssa ja johtaa jopa kaksinkertaiseen jännitteeseen. Toisin sanottuna kunkin paikan ja kunkin tilanteen jännitetaso on siis riippuvainen kunkin jänniteaallon, heijastuneen ja alkuperäisen, hetkellisarvon vaikutuksesta. (Aro ym. 2003: 209; Hinrichsen 2001: 10 - 11.)

### 3.2.1 Kulkuaallon eteneminen

Kulkuaallolla johtimen resistanssi, induktanssi, konduktanssi ja kapasitanssi on mielletävä johtimen pituuden mukaan tasaisesti jakautuneiksi. Kun näitä kuvataan mielivaltaisen lyhyellä johtoalkiolla jännitteen ja virran muutoksen suhteen, päädytään niin sanottuihin lennätinyhtälöihin. Yhtälöitä tutkittiin ensimmäisen kerran 1800-luvun puolivälissä. Nykyään tiedetään, että kaikki sähkönsiirto aina salamaniskusta digitaaliseen tiedonsiirtoon noudattaa ko. yhtälöitä. (Ruppa 2001: 1 - 2.)

Lennätinyhtälön mukaisesti jännitteenmuutokselle pätee

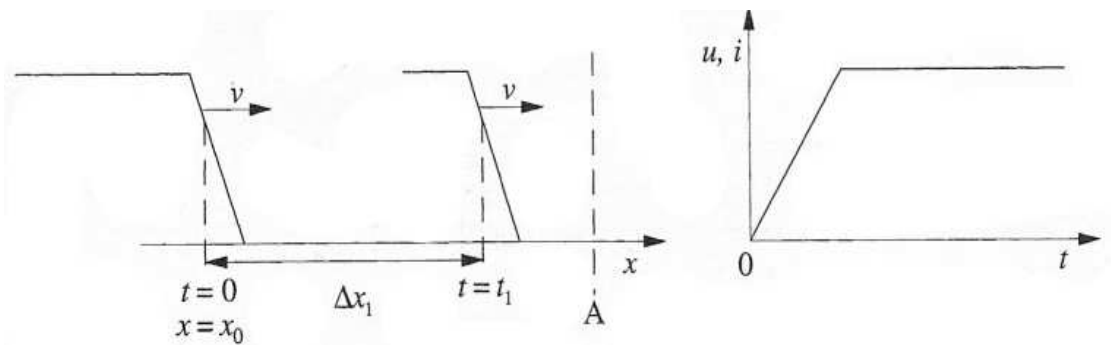
$$\frac{\partial u}{\partial x} = -(r \cdot i + l \frac{\partial i}{\partial t}) \quad (2)$$

ja virranmuutokselle pätee

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -(g \cdot u + c \frac{\partial u}{\partial t}), \quad (3)$$

joissa  $u$  on kulkuaallon jännite,  $i$  on kulkuaallon virta,  $r$  on resistanssi,  $g$  on vuoto-konduktanssi,  $l$  on induktanssi ja  $c$  on kapasitanssi pituusyksikköä kohti. (Aro ym. 2003: 205 - 206; Ruppa 2001: 1 - 3.) Usein yhtälöiden ratkaisun helpottamiseksi johdin oletetaan häviöttömäksi, eli resistanssi  $r = 0$  ja konduktanssi  $g = 0$ . (Ruppa 2001: 2.)

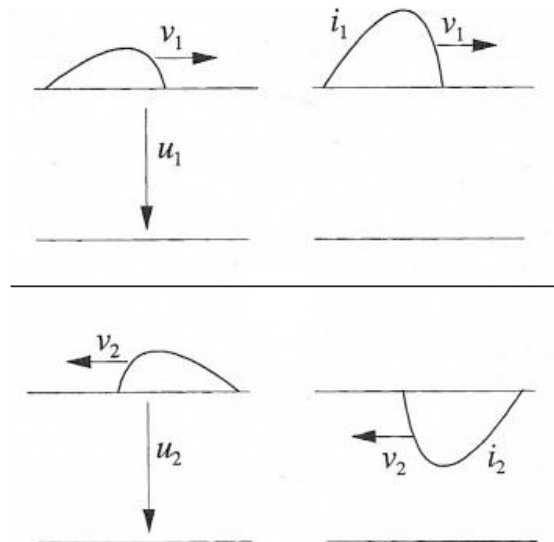
Kun saapuvan kulkuaallon jännitettä tai virtaa halutaan arvioida tietyssä pisteessä, on tarkastelu syytä tehdä ajan suhteen kuvan 10 mukaisesti. Kuvassa jänniteaalto etenee X-akselin positiiviseen suuntaan nopeudella  $v$ . Ajanhetkellä  $t = t_1$  se on edennyt matkan  $\Delta x_1$  verran, eli on kohdassa  $x = x_0 + \Delta x_1$  ja sillä on edelleen sama jännite kuin mikä sillä oli kohdassa  $x = x_0$  ajanhetkellä  $t = 0$ . Pisteessä A jännite alkaa muuttua vasta kun kulkuaalto saavuttaa sen.



**Kuva 10.** Johdolla etenevä aalto ja pisteessä A mitattu jännite (Aro ym. 2003: 207).

Kuvaajan mukaisesti pisteen A jännite (tai virta) muuttuu niin kauan, kun kulkuaallon rintaosa jatkuu, se saavuttaa huippunsa samalla hetkellä, kun etenevän aallon selkäosa on saavuttanut mittauspisteen. Tämän jälkeen ko. esimerkin pisteen A jännite on vakio.

Kun jänniteaalto etenee johdinta pitkin, etenee myös varaus, eli johtimessa kulkee virta. Virta ilmaisee mihin suuntaan varaus johtimella liikkuu. Kuvan 11 mukaisesti, positiiviseen suuntaan (vasen yläkuva) liikkuva varaus aiheuttaa positiivisen virran (oikea yläkuva) ja vastaavasti negatiiviseen suuntaan (vasen alakuva) liikkuva positiivinen varaus negatiivisen virran (oikea alakuva). (Aro ym. 2003: 207 - 208.)



**Kuva 11.** Vastakkaisiin suuntiin kulkevat jänniteaallot ja niihin liittyvät virta-aallot (Aro ym. 2003: 207).

### 3.2.2 Aaltoimpedanssi ja etenemisnopeus

Aaltoimpedanssi  $Z$  riippuu johtimen rakenteesta, mutta ei pituudesta, jännitteestä tai virrasta. Johdon aaltoimpedanssin suuruuteen vaikuttavat rakenteellisten tekijöiden lisäksi induktanssi  $l$  ja kapasitanssi  $c$  pituusyksikköä kohti sekä eristysaineeseen liittyvät tekijät permeabiliteetti  $\mu$  ja permittiivisyys  $\varepsilon$ . (Aro ym. 2003: 209.) Aaltoimpedanssi  $Z$  voidaan laskea ilmaeristeiselle häviöttömälle johdolle yksinkertaistetusti yhtälöllä

$$Z = \frac{1}{2 \cdot \pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \ln \frac{2 \cdot h}{r_1} = 60 \cdot \ln \frac{2 \cdot h}{r_1}, \quad (4)$$

missä  $\mu_0$  on tyhjiön permeabiliteetti,  $\varepsilon_0$  on tyhjiön permittiivisyys,  $h$  on johtimen asennuskorkeus ja  $r_1$  on johtimen säde (Aro ym. 2003: 210). Tämä pätee silloin, kun taajuus oletetaan äärettömäksi ja paluujohdin häviöttömäksi, sekä kohteiden väliaineena on tyhjiö.

Yksivaihekaapelin tai yksivaiheisesti koteloidun GIS-putken aaltoimpedanssin suuruuteen vaikuttavat rakenteelliset tekijät johtimen säde  $r_1$  ja vaipan sisäsäde  $r_2$ , sekä samat eristysaineeseen liittyvät tekijät kuin johdollekin. (Aro ym. 2003: 211.) Näin ollen yksivaiheisen kaapelin tai koteloidun GIS-putken aaltoimpedanssi voidaan laskea yksinkertaistetusti yhtälöllä

$$Z = \frac{1}{2 \cdot \pi} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \ln \frac{r_2}{r_1}, \quad (5)$$

missä  $\mu$  on väliaineen permeabiliteetti,  $\varepsilon$  on väliaineen permittiivisyys,  $r_1$  on johtimen säde ja  $r_2$  on vaipan sisäsäde (Aro ym. 2003: 211).

Kun kulkuaalto etenee aineessa, jonka permeabiliteetti ja permittiivisyys eroavat tyhjiön arvoista, muuttuu aallon kulkunopeus vastaavasti. Aallon etenemisnopeus  $v$  on

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu \cdot \varepsilon}} \quad (6)$$

(Aro ym. 2003: 210).

Taulukossa 1 on esitettyä tyypillisiä sähköjälkelussa käytettyjen komponenttien aalto-ominaisuuksia, jossa maapiirin ominaisresistanssi on jo otettu huomioon.

**Taulukko 1.** 123 - 420 kV komponenttien aalto-ominaisuuksia (Aro ym. 2003: 211).

Kulkuaallon etenemistie	$Z_w$ $\Omega$	$v$ m/ $\mu$ s
Salamaura (alapää)	400 – 800	150 – 250
Yksinkertainen virtajohdin	430	250
Nippujohdin, kaksi osajohdinta	330	265
Ukkosjohdin	470	240
2 ukkosjohdinta	280	240
Kaksoisjohdon vapaasti seisova pylväs	250	290
Portaalipylväs, kaksi jalkaa	130	290
Harustettu portaalipylväs haruksineen	50	290
Konsentrinen GIS-putki (yksivaiheinen GIS)	60	290
Kaapelit	10 – 40	150 – 200
Maahan upotettu johdin	170	100

Tyhjiössä ja ilmaeristeisellä häviöttömällä johtimella aalto etenee valonnopeudella eli noin 300 metriä per mikrosekunti. Mitä suurempi aaltoimpedanssi on, sitä pienempi aallon etenemisnopeus on. Yleisesti ottaen avojohdon aaltoimpedanssi on noin kymmenkertainen kaapelin tai GIS-putken impedanssiin verrattuna. (Aro ym. 2003: 210 - 211.)

### 3.2.3 Kulkuaallon teho ja energia

Kulkuaallon hetkellinen teho  $p$  määritetään yksinkertaisesti

$$p = u \cdot i, \quad (7)$$

missä  $u$  ja  $i$  ovat siis toisiaan vastaavat hetkellinen jännite ja virta. Kulkuaallon energia  $W$  puolestaan saadaan integroimalla yhtälön 7 tehon itseisarvo tarkasteluajan suhteen

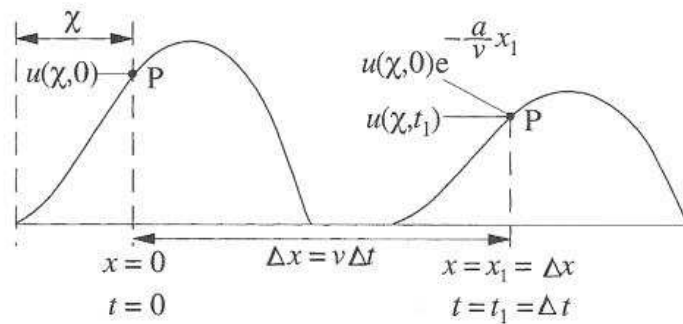
$$W = \int_{t_1}^{t_2} |p| dt, \quad (8)$$

missä  $t_1$  on tarkasteluajan alaraja ja  $t_2$  on tarkasteluajan yläraja (Aro ym. 2003: 212; Rupp 2001: 5). Yhtälössä 8 käytetään tehon itseisarvoa, jotta sen käyttö molempiin

suuntiin etenevän kulkuaallon käsittelyyn on mahdollista. Integrointia ei tarvita, mikäli aalto on amplitudiltaan vakio.

### 3.2.4 Kulkuaallon vaimeneminen

Johtimella kulkeva aalto vaimenee johtimella tapahtuvien häviöiden vuoksi. Aallon amplitudia pienentäviä häviöitä ja vääristymistä syntyy muun muassa johtimissa ja maavirran paluutiellä tapahtuvasta virranahdosta, avojohtojen koronasta ja eristeiden tehohäviöistä. Aallon vaimenemista on kuvattu kuvassa 12.



**Kuva 12.** Kulkuaallon vaimeneminen johtimella (Aro ym. 2003: 214).

Kuvassa 12 esitetty kulkuaalto etenee paikasta  $x = 0$  ajanhetkeltä  $t = 0$ , missä pisteen P jännite on  $u(x,0)$  paikkaan  $x = x_1$  ajanhetkelle  $t = t_1$ , missä pisteen P jännite on  $u(x,t_1)$ . Edetty matka  $\Delta x = v\Delta t$  ja kulunut aika  $\Delta t$ . Kuten kuvasta 12 nähdään, vaimeneminen on pienentänyt pisteen P jännitettä eksponentiaalisen kertoimen  $e^{-\alpha\Delta t}$  verran, missä  $\alpha$  on vaimennuskerroin ja  $t$  on aika (Aro ym. 2003: 213 - 214; Partanen 2011: 3 - 4). Aalto vaimenee siis ajan mukaan eksponentiaalisesti muotonsa säilyttäen, missä  $\alpha$  määrittää vaimenemisen nopeuden seuraavasti

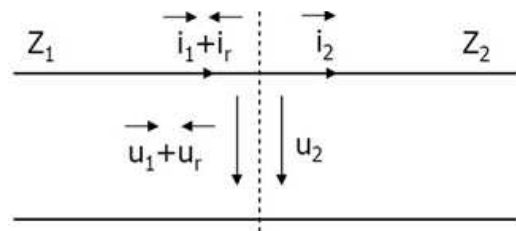
$$\alpha = \frac{r}{2 \cdot l} + \frac{g}{2 \cdot c} \quad (9)$$

(Partanen 2011: 3 - 4). Yllä olevassa tapauksessa johtimien on oletettu olevan vääristymättömiä, mutta todellisuudessa näin harvoin on. Toisin sanoen vääristymisen johdosta myös kulkuaallon muoto muuttuu. (Aro ym. 2003: 214; Partanen 2011: 4.)



### 3.2.5 Kulkuaallon heijastuminen

Kulkuaallon heijastuminen on riippuvaista johtimien ominaisista aaltoimpedansseista ja niiden keskinäisestä suhteesta. Kuvassa 13 on esitettynä kulkuaallon käyttäytyminen epäjatkuvuuskohdassa. Fysikaalisten lakien perusteella epäjatkuvuuskohdassa ei voi tapahtua äkillistä tehonmuutosta, eli kokonaisjännitteen ja kokonaisvirran jatkoksen molemmiin puolin on oltava samat. Toisin sanottuna jatkavan aallon jännite ja jännite ovat yhtä suuret kuin tulevan ja heijastuvan aallon virtojen ja jännitteiden summat.



**Kuva 13.** Kulkuaallon käyttäytyminen epäjatkuvuuskohdassa (Partanen 2011: 7).

Kuvasta 13 nähdään kuinka tuleva aalto  $u_1$  etenee epäjatkuvuuskohtaan, josta siitä heijastuu takaisin  $u_r$  suuruinen osa ja etenee  $u_2$  suuruinen osa, sekä näitä vastaavat virrat. Aineiden aaltoimpedanssien suuruudet vaikuttavat heijastuvan jännite ja virta-aallon amplitudiin ja polariteettiin. Jatkavan aallon jännite  $u_2$  saadaan

$$u_2 = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} u_1, \quad (10)$$

missä  $u_1$  on tuleva jännite,  $Z_1$  on ensimmäisen materiaalin aaltoimpedanssi ja  $Z_2$  on toisen materiaalin aaltoimpedanssi. Näin ollen heijastuva jännite  $u_r$  on jatkavan jännitteen ja saapuvan jännitteen erotus. (Aro ym. 2003: 216; Partanen 2011: 7 - 8; Ruppä 2001: 7.)

Aallon edetessä suurempi-impedanssiselta avojohdolta ( $Z_1 = 400 \, \Omega$ ) noin kymmenen kertaa pienempi-impedanssiseen kaapeliin ( $Z_2 = 40 \, \Omega$ ), on jatkavan jänniteaallon suuruus noin 18 % tulevasta aallosta, ja vastaavasti aallon edetessä päinvastaiseen suuntaan, on jatkavan aallon suuruus noin 182 % tulevasta aallosta. Tämän vuoksi yleisesti ajatellaan kaapelin suojaavan itse itsensä ylijännitteiltä. (Aro ym. 2003: 216.)

## 4 ERISTYSKOORDINAATIO

Sähköverkon eristysrakenteet pyritään toteuttamaan siten, että ne kestävät suurimman osan verkossa esiintyvistä jänniterasituksista laitteen koko eliniän ajan ilman laitteen pysyviä vaurioita tai käyttöhäiriöitä. Ylijännitteiden suuruuden ja esiintymistiheyden ollessa satunnaissuure ei ole taloudellista eikä käytännössä edes mahdollista toteuttaa sähköverkkorakennetta siten, ettei yli- tai läpilyöntejä koskaan tapahtuisi. Ylijännitesuojaus on keskeinen osa eristyskoordinaatiota, jolla huolehditaan siitä, että eristysrakenteiden jännitelujuus mitoitetaan siten, että käyttöhäiriöiden ja laitevaurioiden määrä alenee taloudellisesti hyväksyttävälle tasolle. (Aro ym. 2003: 323; Elovaara & Haarla 2011: 29.)

Ylijännitesuojauksen tehtävänä on rajata ylijännitteet, niiden tyypistä riippumatta, niin alhaisiksi, etteivät ne enää ole vaaraksi eristysrakenteille. Eristyskoordinaatiota suunniteltaessa suurin painoarvo annetaan arvokkaimpien ja sähkönjakelun jatkuvuuden kannalta tärkeimpien laitteiden suojaukselle. Tällaisia laitteita ovat muun muassa muuntajat, kaasueristetyt kytkinlaitokset, kaapelit päätteineen ja jatkoksineen sekä pyörivät sähkökoneet. Ylijännitesuojien tyypin valinnan ja mitoituksen laskennan lisäksi on tärkeää valita suojan sijoituspaikka oikein siten, että sen suojausvaikutus ja alue on halutunlainen. (Aro ym. 2003: 323.)

### 4.1 Eristyskoordinaation periaatteet ja toteutus

Eristyskoordinaation toteutus on käytännössä kaksivaiheinen prosessi, jonka ensimmäisessä vaiheessa selvitetään tai arvioidaan mahdollisesti esiintyvien jänniterasitusten suuruus ja esiintymistiheys, joiden perusteella määritellään tarvittavat eristystasot siten, että laitteet kestävät omilla sijoituspaikoillaan niihin kohdistuvat jänniterasitukset. Toisessa vaiheessa varmistetaan, että kullakin laitteella on vaaditut jännitelujuusominaisuudet, jotka saadaan selville tyyppi- tai kappalekokeina suoritettavilla jännitekokeilla. (Aro ym. 2003: 323; IEC 60071-1: 15.)

Järjestelmäanalyysin eli jänniterasitusten suuruuden ja alkuperän, eristysrakenteiden jännitelujuusominaisuuksien sekä suojalaitteiden suojausominaisuuksien selvittämisen jälkeen on sovittava tai määriteltävä suoriutumiskriteeri, jonka perusteella arvioidaan eristysrakenteiden suoriutuminen rasituksista. Tavallisesti suoriutumiskriteeriksi valitaan eristysten vikatiheys, jolle annetaan arvo aikaisemman käyttöhistorian tai luotettavuus- ja käytettävyyshanalyysien perusteella. Laitteille hyväksyttäviä suoriutumiskriteereitä ovat 0,001 - 0,004 vikaa vuodessa ja ilmajohdoille 0,1 - 20 vikaa kilometriä ja vuotta kohti ukkosen aiheuttamille vioille. (Aro ym. 2003: 323; IEC 60071-2: 65.) Suoriutumiskriteerin perusteella määritellään koordinaatiokerroin  $K_c$ , jonka avulla saadaan jännitelujuutta kuvaavat koordinaatiokestotasot  $U_{cw}$  seuraavasti

$$U_{cw} = K_c \cdot U_{rp}, \quad (11)$$

missä  $U_{rp}$  on jänniterasitusta edustava jännite. Koordinaatiokertoimella otetaan huomioon eristysrakenteen suoriutumiskriteerin lisäksi ylijännitteiden määrittämiseen liittyvä tarkkuus, joka riippuu eristyskoordinaation toteutustavasta (Aro ym. 2003: 324 - 325).

Koordinaatiokestotasot määräävät eristykseltä vaadittavat jännitelujuusominaisuudet asennuspaikalla. Jotta koordinaatiokestotasot voitaisiin todentaa laboratorio-olosuhteissa, on pystyttävä huomioimaan asennuspaikkojen erot laboratoriossa ja asennuspaikalla muun muassa sään, ilmaston, asennuksen hajonnan ja asennuskorkeuden suhteen. Usein laiteasennuksessa syntyvät erot, eristysvanheneminen ja muut mahdolliset erot yhdistetään yhdeksi ainoaksi kertoimeksi  $K_s$  (varmuuskerroin). Korkeus- ( $K_a$ ) sekä sää- ja ilmastotekijät esitetään yleensä yhtenä korjauskertoimena  $K_t$ . (Aro ym. 2003: 325; IEC 60071-1: 13 - 15, 19.)

Vaadittavat jännitteen kestotasot  $U_{rw}$  saadaan laskettua yhtälöllä

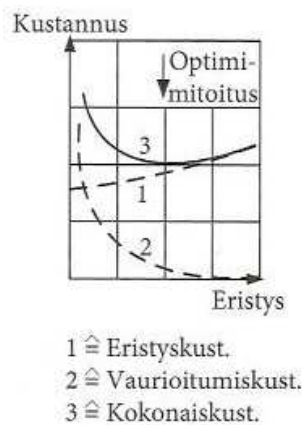
$$U_{rw} = K_s \cdot K_t \cdot U_{cw} \quad (12)$$

(Aro ym. 2003: 325, IEC 60071-1: 13 - 15, 19). Kerroin  $K_t$  voidaan jättää pois sisätiloihin asennettavia eristeitä laskettaessa. Tällöin on huomattava, että asennuskorkeu-

desta johtuvaa paineen muutosta korjaava kerroin  $K_a$  voi helposti jäädä huomioimatta, sillä tavallisesti se on sisällytettynä ilmastolliseen korjauskertoimeen. Yksinkertaisin tapa sisätiloihin suunniteltujen eristyksien laskennassa on korvata kerroin  $K_t$  kertoimella  $K_a$ . (IEC 60071-1: 19; IEC 60071-2: 85.)

Vaadittavien kestotasojen selvittämisen jälkeen valitaan standardien mukaiset kestotasot  $U_w$  siten, että ne ovat vähintään yhtä suuria kuin vaaditut jännitteen kestotasot. Standardi IEC 60071-1 määrittelee niille arvot laitteen suurimman käyttöjännitteen  $U_m$  ja jänniterasituksen muodon mukaan. Standardi antaa kestotasojen lukuarvot, joista käyttäjän tulee valita riittävä kyseessä olevaan tapaukseen. (Aro ym. 2003: 325; IEC 60071-1: 18 - 23.)

Kustannuksia ajatellen eristyskoordinaation optimimitoitus saavutetaan, kun kokonaiskustannukset ovat minimissään, eli kun laitteiden jännitelujuuden lisäämisestä ja ylijännitesuojauksen tehostamisesta koituvat kustannukset ovat yhtä suuret kuin keskeytys- ja vauriokustannusten pienenemisestä koituva säästö. Tilannetta havainnollistavat kuvaajat on esitettyä kuvassa 14. (Elovaara & Haarla 2011: 66.)



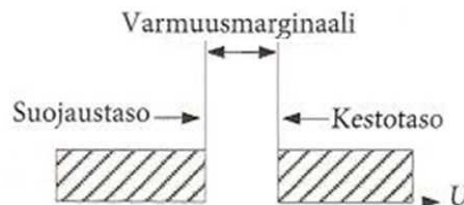
**Kuva 14.** Eristyskoordinaation optimimitoitus (Elovaara & Haarla 2011: 68).

Kuvasta 14 nähdään, että eristyskoordinaatio on kompromissi eristyskustannusten ja vaurioitumiskustannusten välillä. Kustannustehokkain tilanne aikaansaadaan, kun toimitaan kuvassa esitetyn käyrän 3 notkossa. Missään nimessä täydellisen suojauksen toteuttaminen ei ole mielekäästä. (Aro ym. 2003: 326.)

#### 4.1.1 Marginaalimenetelmä

Eristyskoordinaation mitoittamisessa on käytetty konventionaalista menetelmää, eli niin sanottua marginaalimenetelmää jo pitkään. Marginaalimenetelmää käytetään silloin, kun ylijännitteiden tilastollisista ominaisuuksista ei ole tarkkaa tietoa tai kun jännitelujuutta tai ylijännitteiden ominaisuuksia ei pystytä kuvaamaan tilastollisesti, esimerkiksi kun tarkastellaan venttiilisuojiin vaikutusta. Tällöin eristyskoordinaatio on määritettävä ikään kuin varman päälle. (Aro ym. 2003: 325; IEC 60071-1: 18; IEC 60071-2: 67.)

Kestotasolla  $U_w$  tarkoitetaan jännitearvoa, jolla yli- tai läpilyönnin todennäköisyys on hyvin pieni. Suojaustasolla  $U_p$  tarkoitetaan jännitearvoa, jonka ylittäviä arvoja esiintyy ylijännitesuojia käytettäessä varsin harvoin. Edellä mainittujen tasojen välille jätetään kuitenkin aina varmuusmarginaali. Tasot ja marginaali on esitetty kuvassa 15. Marginaalilla pyritään ottamaan huomioon muun muassa venttiilisuojan suojaustason nousu suurilla virroilla, venttiilisuojan ja suojattavan kohteen välinen etäisyys ja eristysten vanhenemisesta johtuva jännitelujuuden pieneneminen. (Elovaara & Haarla 2011: 66, IEC 60071-2: 87 - 89.)

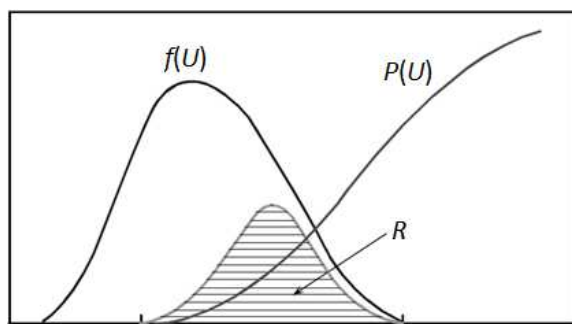


**Kuva 15.** Eristyskoordinaation varmuusmarginaali (Elovaara & Haarla 2011: 68).

Kuvassa 15 esitetyn marginaalimenetelmän suojaustason ja kestotason välistä suhdetta merkitään varmuuskertoimella  $K_S$ . Sen minimiarvoksi on salamasyökyjännitteillä valittava 1,4 pienillä käyttöjännitteillä, 1,2 suurilla käyttöjännitteillä ja 1,1 - 1,2 kytkentäsyökyjännitteillä. Marginaalimenetelmä on ollut riittävä toteutustapa niin kauan kuin eristyskoordinaatiolla on huomioitu vain jyrkät transienttiylijännitteet, eikä koordinaation onnistumiselle ole tarvinnut antaa numeerista arvoa. (Elovaara & Haarla 2011: 66 - 67.)

#### 4.1.2 Tilastollinen menetelmä

Vaihtoehtoinen menetelmä eristyskoordinaation mitoittamiselle ottaa huomioon ylijännitteisiin ja jännitelujuuteen liittyvät satunnaisuudet. Tätä niin sanottua tilastollista eristyskoordinaatiota käytetään järjestelmissä, joissa laitteen suurin sallittu jännite  $U_m$  on vähintään 300 kV (Elovaara & Haarla 2011: 68). Tilastollisessa eristyskoordinaatiossa selvitetään laitteen vaurioitumisriski  $R$ , joka vastaa todennäköisyyttä, jolla esimerkiksi kytkentätapahtuman aiheuttama ylijänniterasitus ylittää eristysrakenteen jännitelujuuden. Kuvassa 16 on esitetty tilastollinen eristyskoordinaatio graafisesti.



**Kuva 16.** Ylijännitteiden tilastolliseen todennäköisyyteen  $f(U)$  ja ylilyönnin todennäköisyyteen  $P(U)$  pohjautuva vaurioitumisriskin  $R$  määritelmä (IEC 60071-2: 77).

Ylilyöntiriski  $R$  voidaan laskea tilastojen perusteella, kun tunnetaan ylijännitteiden tilastollinen todennäköisyystiheys  $f(U)$  ja ylilyönnin todennäköisyys  $P(U)$  kyseessä olevalla jänniterasituksella  $U$ . Graafisesti tulkittuna, ylilyöntiriski määräytyy siis kullekin jännitteelle näiden käyrien tulon integraalista, jonka rajoina käytetään riskitarkastelussa olennaista jännitealuetta. Ylilyöntiriskiä voidaan pienentää suurentamalla jännitelujuutta tai parantamalla suojausta, mikä muokkaa käyriä tai siirtää niitä etäämmälle toisistaan, jolloin myös integraali antaa pienempiä arvoja. (Aro ym. 2003: 325-6; Elovaara & Haarla 2011: 68; IEC 60071-2: 77.)

#### 4.1.3 Standardoidut koejännitteet

IEC-standardin mukaiset jännitteenkestokokeet suoritetaan laitteelle, jotta voidaan riittävällä varmuudella todistaa, että sen jännitteenkesto on todellisuudessa vähintään

sille määritetyn jännitteenkeston suuruinen. Koejännitteinä käytetään standardin mukaisia huippuarvoja ja muotoja, ellei laitevalmistaja ole toisin maininnut (IEC 60071-1: 26). Standardin mukaan laitteet jaetaan suurimman käyttöjännitteen  $U_m$  mukaan ryhmiin; ryhmä 1 kun  $1 \text{ kV} < U_m \leq 245 \text{ kV}$ , ja ryhmä 2 kun  $U_m > 245 \text{ kV}$ . (Aro ym. 2003: 328; Elovaara & Haarla 2011: 62 - 63; IEC 60071-1: 22.)

Ryhmän 1 laitteiden eristystaso määritetään taulukon 2 mukaan, etsimällä laiteen suurimmalle käyttöjännitteelle vastaava standardin mukainen pientaajuisen jännitteen kestotaso PFWV (Power Frequency Withstand Voltage) ja salamasyöksyjännitteen kestotaso LIWV (Lightning Impulse Withstand Voltage). Suomessa yleisimmin käytetyt ryhmän 1 suurimmat käyttöjännitteet ovat 12, 24, 52, 123 ja 245 kV.

**Taulukko 2.** Standardin mukaiset eristystasoarvoparit ryhmän 1 laitteille (IEC 60071-1: 23)

Highest voltage for equipment ( $U_m$ ) kV (r.m.s. value)	Standard rated short-duration power-frequency withstand voltage kV (r.m.s. value)	Standard rated lightning impulse withstand voltage kV (peak value)
3,6	10	20 40
7,2	20	40 60
12	28	60 75 95
17,5	38	75 95
24	50	95 125 145
36	70	145 170
52	95	250
72,5	140	325
100	150 185	380 450
123	185 230	450 550
145	185 230 275	450 550 650
170	230 275 325	550 650 750
245	275 325 360 395 460	650 750 850 950 1050

Ryhmän 2 laitteiden eristystaso määritetään taulukon 3 mukaan, etsimällä laitteen suurimmalle käyttöjännitteelle vastaava standardien mukainen kytkentäsyöksyjännitteen kestotaso SIWV (Switching Impulse Withstand Voltage) ja LIWV. Suomessa yleisimmin käytetty ryhmän 2 suurin käyttöjännite on 420 kV.

**Taulukko 3.** Standardin mukaiset eristystasoarvoparit ryhmän 1 laitteille (IEC 60071-1: 24)

Highest voltage for equipment ( $U_m$ ) kV (r.m.s. value)	Standard rated switching impulse withstand voltage			Standard rated lightning impulse withstand voltage <sup>b</sup> kV (peak value)
	Longitudinal insulation <sup>a</sup> kV (peak value)	Phase-to-earth kV (peak value)	Phase-to-phase (ratio to the phase-to-earth peak value)	
300	750	750	1,50	850
				950
	750	850	1,50	950
				1050
362	850	850	1,50	950
				1050
	850	950	1,50	1050
				1175
420	850	850	1,60	1050
				1175
	950	950	1,50	1175
				1300
	950	1050	1,50	1300
550	950	950	1,70	1425
				1175
	950	1050	1,60	1300
				1425
	1050	1175	1,50	1425
				1550
800	1175	1300	1,70	1675
				1800
	1175	1425	1,70	1800
				1950
	1175 1300	1550	1,60	1950
				2100

Taulukkojen 2 ja 3 arvot ovat kokemuksen mukaan määritettyjä. Joillakin  $U_m$ -arvoilla voi olla jopa viisi eristystasoarvoparia, jolloin kestotason valinta riippuu muun muassa verkon tähtipisteen maadoitustavasta, käytettävien ylijännitesuojien ominaisuuksista ja niiden etäisyyksistä suojattavasta kohteesta sekä siitä, kuinka altis verkko on jyrkille transienttiylijännitteille. Esimerkiksi suuren kaapelointiasteen omaavan verkon tapauksessa salamasyöksyjännitteen kestotasoa voidaan madaltaa kaapelien verrattain pienen ominaisimpedanssin vuoksi. (Aro ym. 2003: 329; Elovaara & Haarla 2011: 63; IEC 60071-1: 25 - 26.)



Vaihtojännitetestaus suoritetaan IEC-standardin mukaan lyhytaikaisena yhden minuutin pituisena koejännitekestokokeena, joko kuivalle tai keinosateen alaisena olevalle komponentille tuomalla jännite sen navoille. Salamasyöksyjännitekoe puolestaan suoritetaan standardin määrittelemällä 1,2/50-pulssilla, jossa rinnan nousuaika on 1,2  $\mu$ s ja selän puoliarvonaika on 50  $\mu$ s (ks. kuva 7, jyrkkä transienttiylijännite). Salamasyöksyjännitekoe on aina kuivakoe. KytKentäsyöksyjännitekestoisuus testataan 250/2500-pulssilla, jossa vastaavasti rinnan nousuaika on 250  $\mu$ s ja puoliarvonaika 2500  $\mu$ s (ks. kuva 7, loiva transienttiylijännite). KytKentäsyöksyjännitekoe suoritetaan sisään asennettaville laitteille aina kuivakokeena ja ulos asennettaville laitteille lisäksi märkäkokeena. (Elovaara & Haarla 2011: 64 - 66.)

#### 4.2 Eristyskoordinaatio käytännössä

Eristyskoordinaation toteuttaminen on käytännössä eristyskoordinaatiotarkastelu, joka suoritetaan koko verkolle, johon otetaan huomioon johdot, kaikki laitteet huomioiden niiden sisäiset ja ulkoiset eristykset sekä kaikki mahdolliset jänniterasitusmuodot. Varsinkin uutta siirtojännitettä otettaessa käyttöön tai eristyssuojauksen mitoitus-sääntöjä muutettaessa on tarkastelu tehtävä varsin laaja-alaisesti. Muissa tapauksissa lähinnä ylijännitesuojien suojausarvojen riittävyyden tarkastelu ja suojien sijoitus-paikkojen määrittäminen riittää. (Aro ym. 2003: 329.)

## 5 YLIJÄNNITTEIDEN RAJOITTAMINEN

Ylijännitteiden rajoittamiseen on mahdollista käyttää toisistaan hyvin poikkeavia menetelmiä, joilla kaikilla on kuitenkin yksi ja sama päämäärä: rajoittaa verkossa esiintyvien ylijännitteiden suuruus niin alhaiseksi, etteivät ne enää ole vaaraksi eristysrakenteille. Ylijännitteiltä suojautuminen toteutetaan eristyskoordinaation mukaan, jossa suojauksen suurin painoarvo annetaan laitteille, joilla on pitkä korjausaika, laaja vaikutusalue sekä suuri taloudellinen arvo.

Suojauksen suunnittelussa ja toteutuksessa on muistettava, että kukin suojausmenetelmä tai -laite on usein tehokas vain yhdentyypiselle ylijännitteelle, jolloin useamman menetelmän käyttäminen voi tulla kyseeseen kattavan suojauksen varmistamiseksi. Tyypillisimpiä ylijännitteiden rajoittamismenetelmiä ovat avojohtojen ylle asennettavat ukkosjohtimet, pylväiden tehokas maadoitus, verkkoon ja etenkin sähköasemien yhteyteen asennettavat ylijännitesuojat sekä suojakondensaattorit.

Pientaajuisten ylijännitteiden suuruuteen on mahdollista vaikuttaa riittävän reaktori-tehon, verkon tehokkaan maadoituksen, releistyksen, jännitteensäätölaitteiden sekä resonanssitilanteissa vaimennuksen, eli pätötehohäviöiden lisäämisen kautta. Myös kipinävälittömillä venttiilisuojoilla on mahdollista rajoittaa pientaajuisia ylijännitteitä, mikäli ne ovat siihen tarkoitukseen mitoitettuja. (Elovaara & Haarla 2011: 30.)

Loivilta transienttiylijännitteiltä voidaan suojautua niin ikään edellisessä kappaleessa mainituilla menetelmillä. Lisäksi katkaisutapahtumia ajoittamalla voidaan saavuttaa etuja muidenkin transienttiylijännitteiden suuruuden pienentämisen kannalta. Esimerkiksi yksivaiheisen pikajälleenkytkennän käyttö kolmivaiheisen sijaan tai katkaisijan vaiheiden tahdistus kunkin nollakohtaan auttaa huomattavasti transienttien pienentämisessä. Näiden lisäksi johdon aaltoimpedanssin suuruisten sulkemisvastusten käyttö katkaisijassa pienentää ylijännitteiden suuruutta jopa 47 %. Myös avausvastusten käytöllä on etuja ylijännitteiden rajoittamisessa, sillä ne rajoittavat tehokkaasti katkaisijan avaamisesta aiheutuvia transientteja. (Elovaara & Haarla 2011: 30 - 31.)

Jyrkiltä transienttiylijännitteiltä suojaudutaan pääasiassa tähän tarkoitukseen valmisteilla ylijännitesuojilla, joita käytetään lähinnä sähköasemien ja kytkinlaitosten muuntajien, kaasueristeisien kojeistojen ja kaapeleiden sekä niiden päätteiden suojaukseen. Suomessa voimassa olevasta käytännöstä ja tarpeesta poiketen, joissakin maissa asennetaan ylijännitesuojat jokaiseen avojohtolähtöönkin. Ylijännitesuojien lisäksi sähköaseman välittömään läheisyyteen asennettava ukkosmasto tai aseman ylle asennettavat ukkosjohtimet antavat tehokkaan suojan lähialueen suorilta salamaniskuilta. (Elovaara & Haarla 2011: 31.)

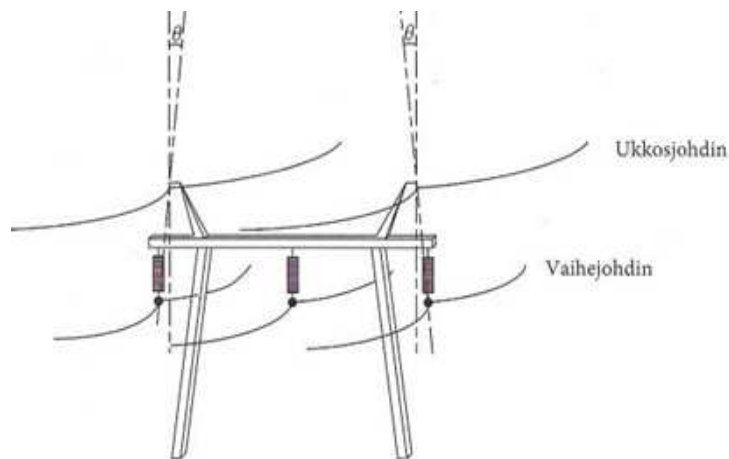
### 5.1 Ukkosjohtimet

Ukkosjohtimien käyttö avolinjojen yläpuolelle sijoitettuna on varsin tehokas tapa houkutella salama iskemään niihin jännitteellisten johtimien sijaan. Niiden tehtävänä on estää suoraan vaihejohtimeen osuvat salamaniskut. Linjasta riippuen ukkosjohtimia on joko yksi tai kaksi. Suomessa ukkosjohtimia käytetään ylijännitesuojaukseen kaikilla 420 kV ja 245 kV johdoilla, sekä suurella osalla 123 kV johtoja. Myös alemmilla jänniteportailta (24 - 52 kV) voidaan käyttää ukkosjohtimia, jolloin tyypillisesti vain sähköaseman lähetyvillä olevat portaalipylväiden välit varustetaan köysin. Myös itse sähköasemat on mahdollista varustaa ukkosköysin. (Aro ym. 2003: 294; Elovaara & Haarla 2011: 32.)

Ukkosjohtimien käytössä on huomioitava mahdolliset lumikuormat ja niiden aiheuttamat johtimien riippumat, sillä ukkosköysissä kulkevat virrat ovat lähes poikkeuksetta liian pieniä lämmittääkseen johtoa riittävästi, jotta lumi ja jää sulaisi. Suomelle tyypillisissä huonoissa maadoitusolosuhteissa ukkosjohtimet pienentävät maadoitusvastusta kytkemällä eri pylväiden maadoitukset rinnakkain. Huonot maadoitusolosuhteet lisäävät takaiskun todennäköisyyttä salamapurkauksen osuessa ukkosjohtimeen, mutta toisaalta ukkosjohtimien reduktiovaikutuksen ansiosta maan kautta palaava virta ja sen vaikutukset pienenevät. Ukkosköydet parantavat suojareleistyksen toimintaa mahdollistamalla herkemmän suojauksen. (Elovaara & Haarla 2011: 32 - 33.)

Mikäli ukkosjohtimia käytetään pelkästään aseman läheisyydessä, niiden tarkoituksena on pienentää vain asemalle tulevia jyrkkiä transienttijännitteitä. Edullisena vaihtoehtona on maadoittaa pelkästään laitosten läheisyydessä olevien puupylväiden orret. Tiedetään, että suoran salamaniskun tai siitä aiheutuneen takaiskun aiheuttamat ylijännitteet vaimenevat ja loivenevat nopeasti jo parin kolmen kilometrin matkalla muun muassa koronan, virranahdon ja maapiirin vaikutuksesta. Joka tapauksessa iskukohdan läheisyydessä tapahtuvat ylilyönnit rajoittavat lähtevien kulkuaaltojen amplitudin korkeintaan johdon jännitelujuuden suuruisiksi. Imatran Voima Oy:n tutkimuksen mukaan ukkosesta johtuneiden häiriöiden määrä köydettömällä 110 kV avojohdolla on 7-kertainen verrattuna maadoitetuilla ukkosjohtimilla varustettuun johtoon. (Elovaara & Haarla 2011: 32.)

Ukkosjohtimien suojausvaikutus riippuu niiden lukumäärästä, sijoituksesta sekä pylväiden maadoitusresistanssiarvoista. Tyypillisesti käytetään kahta ukkosköyttä. Köydet asennetaan vaihejohtimien suuntaisesti niiden yläpuolelle tiettyyn kulmaan (suojauskulma), joka lasketaan sähkögeometrisen mallin avulla. Kuvassa 17 on esitetty suojauskulman määritelmä. (Aro ym. 2003: 297; Elovaara & Haarla 2011: 33 - 34.)



**Kuva 17.** Suojauskulman  $\theta$  määritelmä (Elovaara & Haarla 2011: 33).

Suojauskulman suuruus riippuu johtimen asennuskorkeuden lisäksi käytettävän johdon tyypistä. Sähkögeometristen mallien perusteella suojauskulman on pienennettävä pylvään korkeuden kasvaessa. Korkeuden lisäksi suojauskulmaa on säädettävä maaston

mukaan riippuen siitä, kulkeeko johto tasaisessa vai kumpuilevassa maastossa. Suomessa käytössä olevilla johtoratkaisuilla kulma on tyypillisesti 15 - 25°. Korkeilla (40 - 50 m) pylväillä käytetään negatiivisia suojauskulmia, jolloin ukkosköydet kulkevat uloimpien vaihejohtimien ulkopuolella. (Aro ym. 2003: 297 - 298; Elovaara & Haarla 2011: 34.)

## 5.2 Pylväsmaadoitukset

Ukkossuojattua avojohtoa kannattelevien pylväiden hyvä maadoitus on erittäin tärkeää takaiskujen vähentämisessä. Vaikeista maadoitusolosuhteista tai huonosta maadoituksesta johtuva suuri maapiirin impedanssi lisää ukkosjohtimella varustetun avojohdon takaiskuriskiä. Niinpä maadoitusresistanssien pitäminen pienenä on hyvä keino vähentää niiden määrää. On todettu, että pelkästään pylväiden maadoittamatta jättäminen suurentaa ukkosjohtimilla varustettujen 110 kV johtojoen ukkoshäiriömäärän kaksinkertaiseksi maadoitettuun vastaavaan nähden. Toisaalta liian tehokas maadoittaminenkaan ei ole mielekästä suurten investointikustannuksien vuoksi. (Elovaara & Haarla 2011: 34.)

## 5.3 Ylijännitesuojat

Ylijännitesuojia käytetään pienentämään verkossa esiintyvien ylijännitteiden suuruuksia. Tavallisesti ylijännitesuojia käytetään transienttiluontoisten ylijännitteiden rajoittamiseen. Tyypillisiä suojia ovat kipinävälisuojat, venttiilisuojat tai näiden yhdistelmät. Tänä päivänä venttiilisuoja on tavallisin ylijännitesuojaukseen käytetty komponentti jännitetasosta riippumatta. Toisaalta kipinävälisuoja käytetään vielä etenkin pienemmillä jännitetasoilla. (Aro ym. 2003: 333.)

Kipinävälisuojat toimivat, kun kipinäsarvien välinen jännite nousee kyllin suureksi, jolloin eristeaineena toimiva ilma lyö läpi ja eri potentiaalissa olevien osien välille syttyy valokaari. Tämän valokaaren sammuttamiseksi tarvitaan verkon maadoitustavasta riippuen yleensä katkaisutoimenpide. Venttiilisuojat taas toimivat kuten varistorit, eli

johtavat vain tietyn jänniterajan ylittyessä, jolloin ylijännitteen aiheuttama virta pääsee kulkemaan suojan napojen välillä. Venttiilisuojusta nykyaikaisimpia ovat metallioksidisuoijat, jotka tänä päivänä koostuvat useimmiten ZnO-kiekoista (sinkkioksidi).

Perinteinen suojiin sijoituspaikka on sähköasema, jossa usein suojataan vain tärkeimmät laitteet kuten muuntajat ja kaasueristeiset kojeet. Toinen, tehokkaampi menettelytapa on sijoittaa suoja jokaiseen asemalle tulevaan johtoon katkaisijan johdon puolelle. Suomessa salamaniskutiheys on sen verran alhainen, että vain tärkeimpien laitteiden suojaus on todettu riittäväksi, eikä jäljempänä mainitulle menettelytavalle ole tarvetta. Toisaalta GIS-laitoksien tapauksissa kaikki avojohto- ja muuntajalähdöt varustetaan ylijännitesuojilla. (Aro ym. 2003: 333.)

Tehomuuntajan ja muidenkin laitteiden suojaus huononee yleensä kun laitteen ja ylijännitesuojien välinen etäisyys kasvaa, ellei suojattavalle laitteelle ole asennettu vielä erikseen omia suoja (Aro ym. 2003: 333). Suojan ja suojattavan kohteen välinen etäisyys on kriittinen seikka varsinkin GIS-kojeistojen suojauksen osalta, joissa mahdollisuuksien mukaan pyritään välttämään laitoksen sisään asennettavia arvokkaiden kaasueristeisten ylijännitesuojien käyttöä. Toisaalta vajaan suojauksesta johtuvat korjauskustannukset voivat tulla alkuperäistä säästöä kalliimmaksi. Tämän vuoksi tieto näiden arvokkaiden suojiin tarpeesta on keskeinen osa suojauksen suunnittelua.

### 5.3.1 Suojakipinävälit

Suojakipinävälejä käytetään Suomessa lähinnä vain pienten alle 200 kVA:n muuntamoiden suojaukseen. Investointikustannuksiltaan ne ovat huomattavasti edullisempia kuin muut suojausmenetelmät tai -laitteet. Niiden käyttö ei vaadi valvontaa, sillä ilma on palautuva väliaine ja vaurioituvia osia ei ole. Kipinäväleillä alennetaan ulkoisen eristyksen jännitelujuus suojattavan kohteen kestotason, kuten muuntajan sisäisen eristyksen, alapuolelle, jolloin ylijännite purkautuu muualla kuin suojattavassa kohteessa. (Aro ym. 2003: 353; Elovaara & Haarla 2011: 35.)

Suojakipinävälin toiminta edellyttää, että suojattava kohde kestää kipinävälin mahdollistamat ylijännitteet, sen toiminnasta johtuvan jyrkän jänniteromahduksen sekä valokaaren poistamisen vaatiman pikajälleenkytkennän. Kipinävälin aiheuttamat jyrkät jännitteenmuutokset ovat vaarallisia varsinkin muuntajien käämityksille. Tämän vuoksi kipinäväleillä suojattava laitteet on lisäksi koestettava katkaistulla jänniteimpulssilla. (Ahonen 2010: 14; Aro ym. 2003: 353; Elovaara & Haarla 2011: 35.)

Kipinäväli valitaan niin suureksi, että pientaajuiset ylijännitteet ja loivat transienttiylijännitteet eivät johda kipinävälin ylilyöntiin. Toisaalta väli  $S$  on pidettävä mahdollisimman lyhyenä, jotta jyrkät transienttiylijännitteet löisivät läpi ja rajoittuisivat tehokkaasti. Tyypillisiä Suomen 24 kV verkossa sovellettavia kipinävälejä ovat 80 ja 100 mm yksivälisuojoin sekä 60 ja 80 mm kaksivälisuojoin. (ABB 2000: 9; Aro ym. 2003: 354; Elovaara & Haarla 2011: 36.)

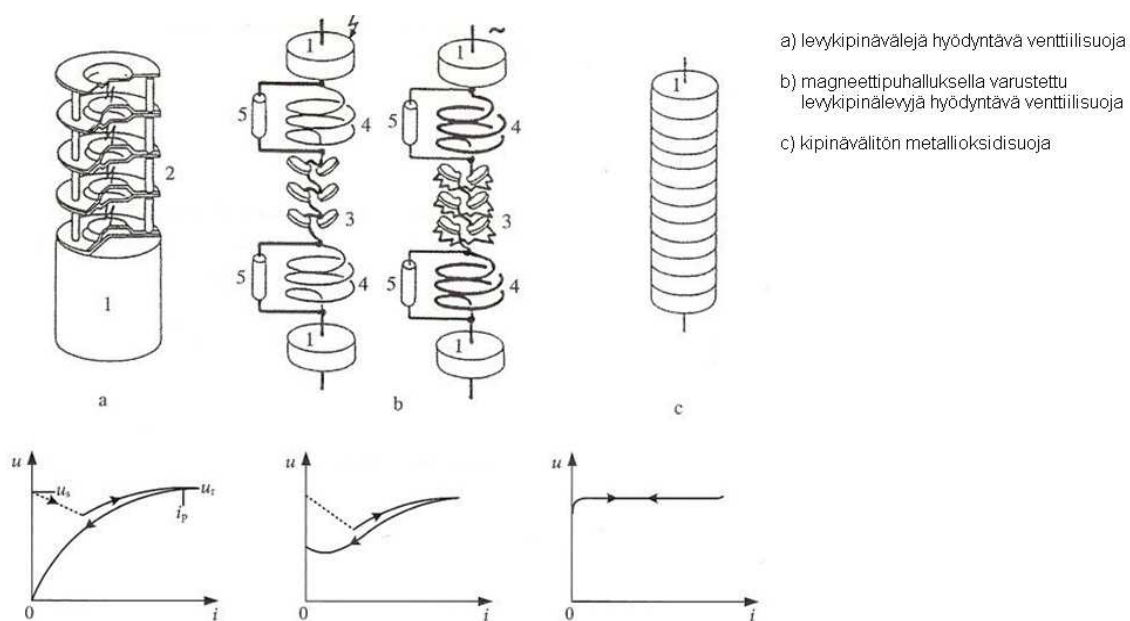
### 5.3.2 Venttiilisuojat

Tehokkain ylijännitteiden rajoittamiskeino tätä nykyä on venttiilisuoja, joka kipinävälisuojan tavoin asennetaan mahdollisimman lähelle suojattavaa kohdetta, yleensä maan ja vaiheen väliin, mutta myös vaiheiden välisiä asennuksia tehdään. Kipinävälillisistä suoista poiketen, venttiilisuojat eivät yleensä tarvitse katkaisu-tapahtumaa normaaliin tilanteeseen palaamiseksi. Ensimmäiset venttiilisuojat olivat pääasiassa piikarbidivastuksella ja sisäisellä kipinävälillä varustettuja venttiilisuoja eli niin sanottuja konventionaalisia suoja. 1960-luvulla varsinkin suurempien jännitteiden suoja alettiin varustaa magneettisella puhalluksella, mikä mahdollisti suojien suuremman energianpurkamiskyvyn ja pienensi suojien läpi kulkevaa virtaa konventionaalisen suojaan nähden. Näitä niin sanottuja aktiivikipinävälisuojaakin paremmat suojausominaisuudet saadaan käyttämällä 1980-luvulla markkinoille tulleita kipinävälittömiä metallioksidisuoja (Aro ym. 2003: 335). Suojien jatkuva kehittyminen ja sitä kautta pienemmät purkausvirrat mahdollistavat alempien suojaustasojen käytön suojattavissa kohteissa. (Elovaara & Haarla 2011: 36 - 37.)

Venttiilisuoja on kahta tyyppiä; kipinävälillisiä ja kipinävälittömiä. Näistä kipinävälittömät suojat ovat valtaamassa alaa yhä enenevässä määrin ylivirtaisten ominai-

suuksiensa johdosta. Kipinävälillisiä venttiilisuoja puolestaan on kahta tyyppiä; toiset sisäisellä ja toiset ulkoisella kipinävälillä, mutta molemmissa on yhteisenä tekijänä kipinävälittömästäkin suojasta löytyvä vastusblokki. Vastusblokkien raaka-aineena on aiemmin usein käytetty piikarbidia (SiC) mutta nyttemmin metallioksidea, joista tyypillisin on sinkkioksidi (ZnO) suotuisien ominaisuuksiensa vuoksi. (Elovaara & Haarla 2011: 36 - 37.)

Kuvassa 18 on esitettynä erityyppisiä venttiilisuoja, joista tyypit a ja b ovat kipinäventtiilivälisuoja ja tyyppi c on kipinävälitön venttiilisuoja, jota nimitetään tavallisesti metallioksidisuoja sen vastusblokin pääasiallisen rakennusaineen mukaan. Kuvassa numerolla 1 on merkitty epälineaarinen vastus, 2 ja 3 kipinäväli, 4 puhalluskäämi sekä 5 puhalluskäämien ohitusvastus. Lisäksi on huomattava, että tyypin a suojassa epälineaarisen vastuksen rakennusaineena on SiC, mitä on kuvattu suuremmalla vastusblokillä, mutta myös metallioksidielementeistä koostuvia kipinäventtiilivälisuoja on olemassa. (Aro ym. 2003: 334.)



**Kuva 18.** Eri tyyppisiä venttiilisuoja ja niiden toimintaperiaatteita (Elovaara & Haarla 2011: 238).

Kuvan 18 käyrissä on esitetty kunkin suojatyyppin toiminta virta-jännite-kuvaajassa. Molemmat kipinävälilliset suojat tarvitsevat aluksi syttymisjännitteen  $u_s$  suuruisen



jännitteen valokaaren sytyttämiseksi, ilman ionisoiduttua suojan toimintapiste siirtyy venttiilivastuksen virta-jännite-ominaiskäyrälle. Magneettipuhalluksella varustettu aktiivikipinäsuoja kykenee sammuttamaan valokaaren konventionaalista suojaa nopeammin (korkeammalla jännitteellä), kun valokaarta pidennetään magneettikelojen puhalluksella. (Aro ym. 2003: 335 - 336; Elovaara & Haarla 2011: 237.) Kuvaajien perusteella on selvää, että tyypin c metallioksidisuojan toiminta on lähimpänä ideaalista epälineaarista vastusta, minkä vuoksi se onkin kolmikon tehokkain.

Nimensä mukaisesti venttiilisuoja toimii venttiilinä, joka päästää purkausvirran kulkemaan lävitsensä vasta tietyn jännitteen kynnysrajan ylityttyä. Ideaalinen venttiilisuoja on kynnysjännitettä alemmilla jännitteillä täydellinen eriste ja sen yläpuolella täydellinen oikosulku. Käytännössä kipinävälittömät suojat vuotavat kuitenkin noin yhden milliampeerin virtaa lävitsensä myös kynnysjännitteen alapuolella normaalilla käyttöjännitteellä (ABB 2011b: 16). Tätä ei tapahdu suojilla, jotka on kytketty suojakipinävälin kanssa sarjaan. Kipinävälin olemassa olosta riippumatta, mahdollisimman epälineaarinen vastus on paras rakennusaine hyvään suojaan. (Aro ym. 2003: 335; Elovaara & Haarla 2011: 36 - 37, 238.)

Vastuselementtien valmistusvaiheessa valmistajat lisäävät metallioksidisuojan pääasiallisen rakennusaineen (ZnO) sekaan muitakin metallioksideja, kukin oman reseptinsä mukaan. Näillä metallioksidoilla on suuri vaikutus vastuselementin ominaisuuksiin ja toimintaan, sillä lisätyt metallioksidit kerääntyvät ZnO-jyvien ympärille ja vastaavat suojan syttymisvaiheen tapahtumista, joten valmistajakohtaiset erot suojien käyttäytymisessä ovat tyypillisiä. Valmiista massasta sintrataan lieriön muotoisia elementtejä, jotka päällystetään kosteudelta ja kemiallisilta vaikutuksilta suojaavalla massalla sekä niiden päädyt metalloidaan kosketusvastuksen pienentämiseksi. (ABB 2011b: 10; Aro ym. 2003: 337; Elovaara & Haarla 2011: 239.)

Kipinävälittömät metallioksidisuoja koostuvat päällekkäin ladotuista vastuselementeistä, jotka on hermeettisesti suljettu, usein posliinista, mutta nyttemmin myös polymeeristä valmistettuun eristinkuoreen. Polymeerikotelointi voidaan toteuttaa esimerkiksi silikonipäällystetyllä lasikuitusylinterillä, minkä ansiosta suojissa tapahtuvien ylilyöntien aiheuttamat kuoren pirstoutumiset ovat vähentyneet merkittävästi posliini-

koteloituihin suojiin nähden. Lisäksi polymeerikoteloinnin ansiosta suojat ovat kevyempiä sekä niiden ulkokuori hylkii vettä ja likaa entistä paremmin. (ABB 2011b: 8; Aro ym. 2003: 337; Elovaara & Haarla 2011: 239.)

Kipinävälittömän venttiilisuojan toiminnan ja kestoiän kannalta on tärkeää, että jännitteenjakauma suojan yli on mahdollisimman lineaarinen. Epälineaarinen jakauma aiheuttaa suuremman jänniterasituksen jännitteellisen pään vastusblokeille kuin maadoitetun pään blokeille, mikä vanhentaa suojaa ennenaikaisesti. Tämän vuoksi varsinkin yli 1,5 m pitkät (yleensä yli 100 kV:n) sekä useasta päällekkäin olevasta osasta koostuvat suojat varustetaan ohjauselektrodilla (Aro ym. 2003: 337; Elovaara & Haarla 2011: 39; Hinrichsen 2001: 29). Kuvassa 19 on esitettynä ohjauselektrodilla varustettu ylijännitesuoja. Elektrodi asennetaan suojan jännitteeseen päähän, josta se ohjaa jännitteenjakaumaa kapasitiivisesti. Lisäksi kapasitiivisen jakauman varmistamiseksi on suojien ympäristössä oltava vähintään vähimmäisetäisyyden verran tilaa muista laitteista ja maadoitetuista kohteista. (Elovaara & Haarla 2011: 240.)



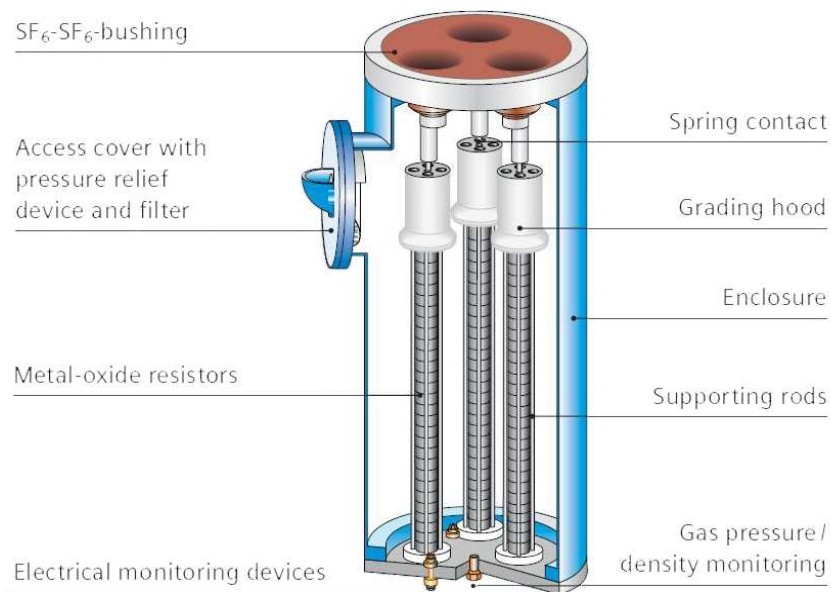
**Kuva 19.** Ohjauselektrodilla varustettu ZnO-suoja, ABB Exlim P (ABB 2012: 96).

Kipinävälittömän metallioksidisuojan etuihin luetaan pehmeä toiminta, sillä se kykenee siirtymään eristystilasta johtavuustilaan ilman ilmapäleille tyypillistä syttymistran-

sienttia. ZnO-suojien lämpötilakerroin on negatiivinen pienillä virroilla. Tämä tarkoittaa sitä, että lämpötilan noustessa vastuselementtien vastus pienenee, mikä puolestaan mahdollistaa suuremman vuotovirran kulkemisen ja edelleen korkeamman lämpötilan. Purkausvirta kasvaa jatkuvasti kunnes tämä niin sanottu *thermal run-away* -prosessi päättyy suojan termiseen läpilyöntiin ja sen tuhoutumiseen. Suojat on siis mitoitettava siten, että ne eivät normaalin käyttöjännitteen tai ylijännitteen purkamisen seurauksena joutu tähän kierteeseen. (Aro ym. 2003: 338; Elovaara & Haarla 2011: 24.)

### 5.3.3 Kaasueristeinen ylijännitesuoja

Kaasueristetyt GIS-ylijännitesuojat ovat metallikoteloituja hermeettisesti eristettyjä venttiilisuojia, joissa eristeaineen on yleensä SF<sub>6</sub>-kaasu (ks. kuva 20). Eristetyn suojan hyötynä on huoltovapaa käyttö likaisissa ja saastuneissa kohteissa, jolloin suojan pinnalle ei pääse kerääntymään likaa, joka voisi heikentää läpilyöntilujuutta tai lisätä vuotovirtaa. Myös ylijännitesuojille vaarallinen kosteus pysyy kaasueristeiden vuoksi poissa suojista. Lisäksi kaasueristetyt ylijännitesuojat voidaan asentaa GIS-kojeiston sisälle, jolloin etäisyys suojattavaan kohteeseen saadaan minimoitua suojan vapaalla sijoittamisella. (Richter 1994: 178.)



**Kuva 20.** Eräs 3-vaiheinen kaasueristeinen ylijännitesuoja. (Siemens 2008: 3).

Kuvasta 20 poiketen kaasueristeisiä ylijännitesuojia on saatavilla myös yksivaiheisina, jolloin ne ovat tyypillisesti suuremmille jännitteille tarkoitettuja. Periaatteessa kaasueristeisen suojan rakenne on hyvin samantyyppinen kuin perinteisen MO-suojan rakenne. Molemmissa on ladottuna riittävä määrä vastusblokkeja sarjaan ja tarvittaessa rinnan, riittävän jännitetaso ja purkauskyvyn saavuttamiseksi. Myös kaasueristeisten suojien tapauksessa, tyypillisin blokkien rakennusaine on ZnO. Korkeiden ZnO-pinojen kentän tasaiseen jakamiseen käytetään niin ikään ohjauselektrodeja pinojen jännitteellisissä päissä (vrt. kuva 20). (Imataki ym. 1984: 2994 - 2995.)

#### 5.3.4 Muita ylijännitteiden rajoittamiskeinoja

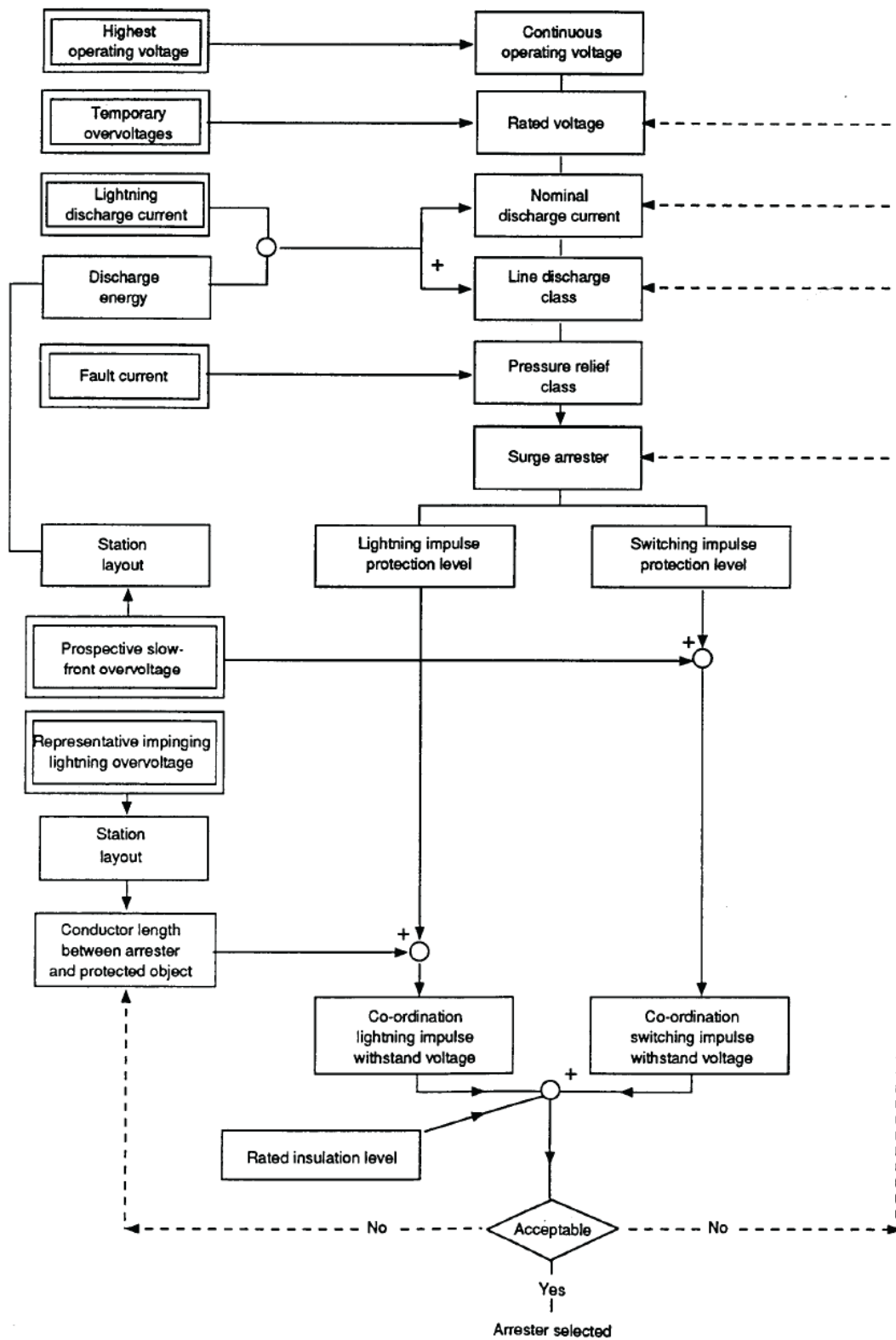
Ylijännitteitä voidaan rajoittaa myös vaihejohtimien ja maan välille kytketyillä kondensaattoreilla, jotka rajoittavat asemalle tulevan syöksyaallon jyrkkyyttä ja usein myös amplitudia. Kondensaattoreiden suojausvaikutusta saadaan suurennettua käyttämällä suurempikapasitanssisia kondensaattoreita. Lisäksi kondensaattoreita voidaan käyttää myös muuntajan ja sen yhteyteen kytkettyjen laitteiden, kuten generaattoreiden suojaustarkoitukseen. Etenkin muuntajan läpi kulkevien syöksyaaltojen rajoittamisen kannalta niiden käyttö on varsin suotuisaa, sillä syöksyjännitteillä muuntaja käyttäytyy sen syöksykapasitanssinsa määräämällä tavalla. Näissä tapauksissa kondensaattorit on kytkettävä toision vaiheiden ja maan väliin. (Elovaara & Haarla 2011: 40.)

## 6 VENTTIILISUOJAN VALINTAKRITEERIT JA SIJOITUS

Tehokkaan suojauksen varmistamiseksi olisi toivottavaa varustaa jokainen suojattava kohde omalla suojalla. Tosin kustannussyistä tämä ei kuitenkaan aina ole järkevää eikä edes mahdollista. Esimerkiksi GIS-laitoksen yhteyteen asennettavien venttiilisuojien käyttöä pyritään välttämään erinäisin vaihtoehdoin niiden kalliin hankintahinnan vuoksi. Suojien sijoituksen merkitys korostuu varsinkin asemilla, joissa suojattavan kohteen (esim. tehomuuntaja) lisäksi halutaan suojata myös sen lähistöllä olevia komponentteja, jolloin suojat voidaan siirtää muuntajan navoista karkeasti korkeintaan jonkun kymmenen metrin päähän. Tällöin niiden suojausalue kattaa paremmin ympäröivät laitteet, mikä tosin heikentää pääkohteen suojausta nostamalla sen suojaustasoa. (ABB 2000: 145; Elovaara & Haarla 2011: 37 - 38; Tyco 2008: 14 - 15.)

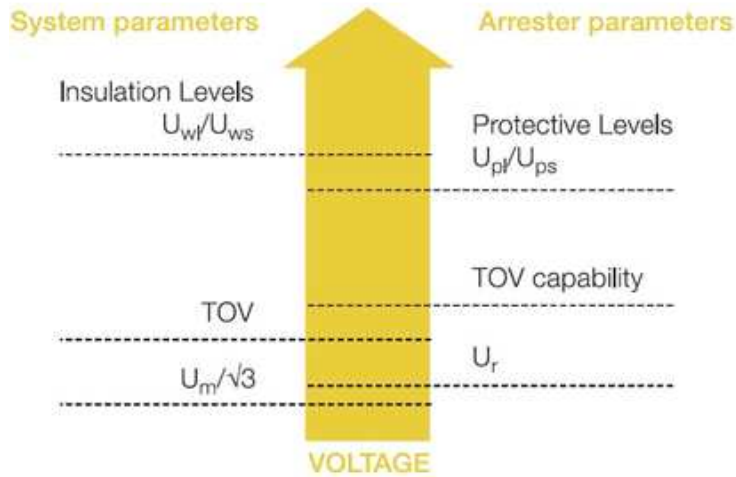
### 6.1 Suojan valintaprosessi

Kuvassa 21 on kuvattuna IEC-standardin mukainen ylijännitesuojan valintaprosessi lohkokaaavana. Prosessissa määritetään suojan jatkuva käyttöjännite järjestelmän suurimman käyttöjännitteen mukaan, määritetään suojan nimellisjännite järjestelmän lyhytaikaisten ylijännitteiden mukaan, määritetään suojan nimellispurkausvirta, salama-  
virran huippuarvo ja suojan luokka sen läpi kulkevan salamapurkausvirran, sen todennäköisyyden ja verkon tarpeen mukaan, valitaan suojan paineenpurkausluokka mahdollisen vikavirran mukaan, valitaan suoja joka täyttää edellä mainitut vaatimukset, määritetään suojan kytkentä- ja salamasyöksyjännitteen suojausominaisuudet, asennetaan suoja mahdollisimman lähelle suojattavaa kohdetta, määritetään suojattavan järjestelmän kytkentäylijännitteen koordinaatiokestotaso, määritetään suojattavan kohteen salamasyöksyjännitteen koordinaatiokestotaso sekä määritetään laitteiden nimellinen eristystaso. (IEC 60099-5: 15.)



**Kuva 21.** Standardinmukainen ylijännitesuojan valintaprosessi (IEC 60099-5: 13).

Kuvassa 22 on esitetty venttiilisuojaan ja suojattavaan järjestelmään liittyvien jännitteiden suhde toisiinsa.



**Kuva 22.** Venttiilisuojaan ja suojattavan järjestelmän jännitteet (ABB 2012: 7).

Kuvan 22 mukaisesti, suojan valintaan liittyvät jännitteet ovat alhaalta ylöspäin lueteltuna: järjestelmän suurin sallittu jännite ( $U_m$ ), suojan nimellisyjännite ( $U_r$ ), järjestelmän hetkellinen ylijännite (TOV), suojan suurin hetkellinen ylijännitteen kestotaso (TOV capability), suojan kytkentä- ja salamasyöksyjännitteen suojaustasot ( $U_{pl}$  &  $U_{ps}$ ) sekä järjestelmän kytkentä- ja salamasyöksyjännitteen kestotasot ( $U_{wl}$  &  $U_{ws}$ ).

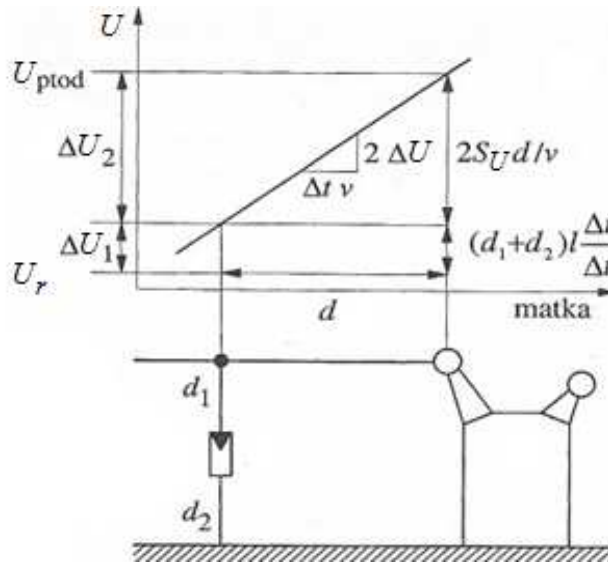
## 6.2 Suojan sijoitus

Perusnyrkkisääntö on seuraava: sijoita suoja mahdollisimman lähelle suojattavaa kohdetta. Lisäksi on muistettava, että venttiilisuojaan nimellissuojaustason ja suojattavan kohteen eristystason välinen marginaali on olemassa vain teoriassa, eli silloin, kun venttiilisuoja on sijoitettu kohteen viereen äärettömän lyhyin yhdysjohtimin. Käytännössä on kuitenkin otettava huomioon ylijännitteen kulkuaaltoluonteesta johtuva jännitteen nousu venttiilisuojaan jälkeisellä johto-osuudella sekä liitoksissa tapahtuvat jännitehäviöt. (Aro ym. 2003: 345, IEC 60071-2: 53.) Perusoletuksena on, että jännite suojattavassa kohteessa on aina suurempi kuin ylijännitesuojan jäännösjännite  $U_{res}$ .

Kuvassa 23 on esitettyä etäisyyden merkitys suojaattavan kohteen kannalta, kun suoja sijoitetaan kohteen eteen. Kuvan tilanteessa kohteen todellinen suojaustaso  $U_{ptod}$  on

$$U_{ptod} = U_r + \Delta U_1 + \Delta U_2 = U_r + (d_1 + d_2)l \frac{\Delta i}{\Delta t} + \frac{2 \cdot S_U \cdot d}{v}, \quad (13)$$

missä  $U_r$  on venttiilisuojan nimellissuojaustaso,  $\Delta U_1$  on induktiivinen jännitehäviö suojan liitos- ja maadoitusjohtimissa,  $\Delta U_2$  on venttiilisuojan ja suojaattavan kohteen välisen matkan aikana syntyvä jännitteen nousu,  $d_1$  on venttiilisuojan liitäntäjohtimen pituus,  $d_2$  on venttiilisuojan maadoitusjohtimen pituus,  $l$  on liitäntä- ja maadoitusjohtimen induktanssi (luokkaa  $1 \mu\text{H/m}$ ),  $S_U$  on tulevan lineaarisesti nousevan syöksyaallon jännitteen jyrkkyys,  $d$  on suojaattavan kohteen ja venttiilisuojan välinen etäisyys ja  $v$  on syöksyjännitteen etenemisnopeus (Aro ym. 2003: 346; IEC 60099-5: 54 - 55.)



**Kuva 23.** Suojaattavan kohteen todellisen suojaustason  $U_{ptod}$  määritelmä (Aro ym. 2003: 346; IEC 60099-5: 54 - 55).

Mikäli yhtälöä 14 käyttämällä saadaan todelliselle suojaustasolle arvo, joka ylittää suojaattavan kohteen koordinaatiokestotason, suojat on joko sijoitettava lähemmäksi suojaattavaa kohdetta tai käytettävä suojia, joilla on alempi suojaustaso. Tämän lisäksi on huolehdittava, että todellisen suojaustason ja suojaattavan kohteen väliin jää yhtälön 12 mukainen riittävä marginaali  $K_C$  (koordinaatiokerroin). (Aro ym. 2003: 346 - 347.)



### 6.3 GIS-kojeiston suojauksessa huomioitavat seikat

Suomessa AIS-ulkokytkinasemien avojohtolähdöt toteutetaan usein ilman venttiilisuoja. GIS-aseman kannalta tilanne on toinen, jolloin suoja on syytä käyttää sekä lähdöissä että suojattavan kohteen navoissa. Toisaalta usein suojien asentaminen suojattavan kohteen napoihin on syystä tai toisesta käytännössä mahdotonta, kuten monesti GIS-laitokseen liityttäessä onkin. Tällöin on tyydyttävä käyttämään venttiilisuoja joko GIS-kojeiston sisällä (Göhler & Klingbeil 2006: 1) tai pelkästään kaapelin ja avojohdon liityntäkohdassa, jolloin liityntäkaapelin pituus on pidettävä mahdollisimman lyhyenä, avojohdo on varustettava maadoitetuin ukkosjohtimin sekä käytettävien suojien suojaustaso on oltava alhainen. (ABB 2000: 145; Elovaara & Haarla 2011: 39; Tyco 2008: 13.)

Mikäli kyseessä on isohko GIS-kojeisto, on harkittava kojeiston yhteyteen asennettavien kaasueristeisien suojien käyttöä entistä tarkemmin. Etenkin yli 100 m pitkien kiskojen tapauksessa on kojeiston sisään sijoitettujen suojien käyttö hyvinkin perusteltua. Toisaalta kaasueristeisien ylijännitesuojien käytöltä voidaan usein välttyä esimerkiksi muuttamalla kiskostoratkaisua, suunnittelemalla verkon käyttötilanteet huolellisemmin tai alentamalla suojaustasoa esimerkiksi peräkkäisillä ylijännitesuojilla. (Aro 2003: 349; Suomen Sähkölaitosyhdistys r.y. 1992: 4.) Mikäli GIS-kojeisto liityntä tehdään maakaapelilla, ei välttämättä tarvitakaan kaasueristeisiä ylijännitesuoja (Pryor & Richter 1998: 143) vaikka ne tarjoavatkin huomattavaa lisäsuojaa perinteisiin suojiin nähden (Göhler & Klingbeil 2006: 6).

Vaikka keskustelua kaasueristeisien suojien käytöstä ja tarpeellisuudesta on käyty jo pitkään, vieläkin ei ole selvää todistetta niiden tarpeellisuudesta hyvin suunnitellun GIS-laitoksen ylijännitesuojauksessa, etenkin alle 230 kV jännitetasolla (IEEE C62.22 2009: 44 - 45). GIS-laitoksen kannalta kriittisimpänä tilanteena pidetään takaiskua, sillä asemalle liittyvät avojohdot ovat tavallisesti varustettu kattavin ukkosköysin suoria salamaniskuja vastaan. (Aro ym. 2003: 349; Elovaara & Haarla 2011: 39.)

## 7 ESIMERKKITAPPAUS JA SEN SIMULOINTI

Kuten edellä olevasta teoriasta voidaan todeta, suojattavan kohteen eristystason ja ylijännitesuojan tarpeellisuuden määrittäminen sekä suojan valinta ja sijoitus on yksinkertaisissa tapauksissa varsin suoraviivaista. Tilanne vaikeutuu huomattavasti, kun suojattava kohde onkin GIS-asema, johon lisäksi liitytään kaapelein avojohdolta. Tällöin ongelmaksi muodostuu kojeiston sisälle asennettavien suojien tarpeellisuuden määrittäminen. Tähän kun ei standardinkaan mukaan ole mitään selvää menetelmää tai sääntöä, jolloin tapauskohtainen tietokonesimulointi on lähes poikkeuksetta ainoa kustannustehokas tapa tarkastelun suorittamiseen. Tässä työssä tehtävän simuloinnin tarkoituksena on esimerkkitapausta käyttäen tuoda esille eräs menetelmä GIS-kojeiston sisälle tarvittavien ylijännitesuojien tarpeellisuuden määrittämiseen.

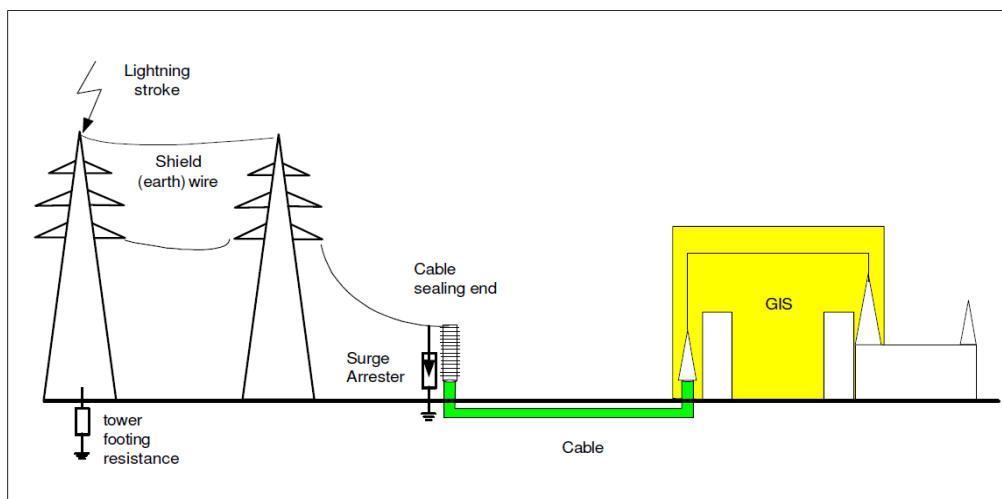
### 7.1 Lähtökohdat tutkimukselle

Yleensä sähköasemalle tulevien jyrkkien ylijännitteiden suuruuden ja muodon määrittämiseksi on tehtävä tarkastelu erikseen sekä suoraan johtoon osuneille iskuille että takaiskuille. Usein oletetaan, että suoraan johdolle osuneet iskut ovat tapahtuneet niin kaukana asemasta, että iskukohdasta tapahtuneiden heijastuksien vaikutus voidaan sivuuttaa ja että ylijännitteen huippuarvo rajoittuu enintään johdon kestotason arvoon (kriittinen jännite). Esimerkkitapauksessa näin ei tehdä, vaan myös lähelle asemaa osuva suora salamanisku huomioidaan. Takaiskun osalta on perusteltua keskittyä ainoastaan aseman lähellä tapahtuviin takaiskuihin jännitteen nopean vaimenemisen ja asemalta heijastuvien jänniteaaltojen vaikutuksen vuoksi. (Aro ym. 2003: 294)

Tarkastelun yksinkertaistamiseksi riittää, kun otetaan huomioon vain pahimmat tapaukset, eli toisin sanottuna suoritetaan tarkastelu vain niiltä verkon osilta ja niillä laitteiden tiloilla, joilla aiheutuu suurin ylijännite. Tällöin voidaan päätellä, että mikä tahansa muu yhdistelmä tai tilanne aiheuttaa pienemmän tai yhtä suuren ylijännitteen ja täten pienemmän tai yhtä suuren laitteiden vaurioitumisriskin. Näin ollen esimerkiksi tutkittavan lähdön GIS-kojeistossa sijaitsevan katkaisijan oletetaan olevan auki, sillä

tämä johtaa jännitteen kaksinkertaistumisen myötä suurempaan ylilyöntiriskiin (Aro ym. 2003: 239). Lisäksi, mikäli kaikki lähdöt olisivat kytkettyinä, tulisi saapuva ylijännitepulssi jakautumaan näiden kesken johtaen pienempään ylijännitteeseen. (Kessel ym. 2008: 1.)

Kuvassa 24 on kuvattu GIS-aseman liityntä avojohtoon, jossa avojohtolinjan viimeiseltä pylväältä (portaalipylväältä) liitytään kaapelipäätteeseen, jonka yhteyteen ylijännitesuoja on yleensä sijoitettuna. On tavallista, että sekä pääte että suoja sijoitetaan ylös portaalipylväälle, jolloin pylväältä tullaan alas kaapelilla, jolla jatketaan GIS-kojeiston päätteelle saakka. Yhdyskaapelin käyttö antaa vapauksia sekä toteutuksen että turvallisuuden osalta. On selvää, että usean suoran avojohtolinjan liittäminen kompaktiin GIS-kojeistoon ei ole suotavaa, eikä yleensä edes mahdollista riittävien ilmävälien vuoksi. (Kessel ym. 2008: 8.)



**Kuva 24.** Tyypillinen GIS-laitoksen liityntä avojohtoon (Osborne ym. 2007: 2).

Liityntäkaapelin pituuden lisäksi tärkeimpiä seikkoja ylijänniteriskin määrittämisen kannalta ovat kojeistoon liittyvien avojohtolinjojen sähkögeometriset mallit, jotka määräävät ukkosesta määräytyvien virtojen suuruudet. Näiden lisäksi simuloinnin suorittamiseksi on laskettava salamaniskun aiheuttama virta vaihejohtimessa sekä siitä koituvan impulssin rinnan nousuaika ja puoliarvonaika. Seuraavissa kappaleissa on esitetty eräs tapa määrittää nämä parametrit sekä suoralle salamaniskulle että takaiskulle.

## 7.2 Suora salamanisku

Suora salamanisku aiheutuu nimensä mukaisesti suoraan vaihejohtimeen osuvasta salamaniskusta. Mikäli suorasta salamaniskusta aiheutuva jännite on riittävän iso, johtaa se avojohtolinjan eristimien ylilyöntiin. Tutkimuksien mukaan iskun virta riippuu salaman iskuetäisyydestä vaihejohtimeen, mikä taas määräytyy tutkittavan avojohtolinjan sähkögeometrisesta mallista (ks. liite 1). Liitteessä 2 on esitetty seuraavia yhtälöitä soveltavat laskutoimitukset esimerkkitapauksen arvoja käyttäen.

### 7.2.1 Suurin salamavirta

Kun tiedetään salaman suurin mahdollinen iskuetäisyys  $d_{\max}$  vaihejohtimeen, voidaan määrittää suurin suojauksen epäonnistumisesta johtunut salamavirta  $I_{\max}$

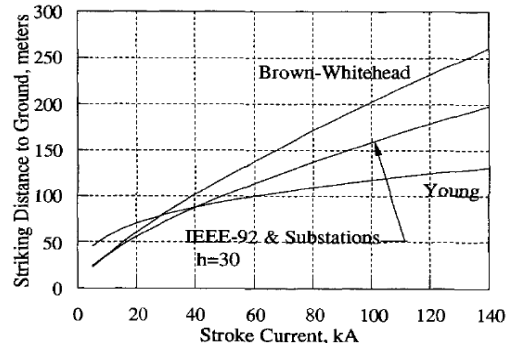
$$I_{\max} = \left( \frac{d_{\max}}{A} \right)^{\frac{1}{b}}, \quad (14)$$

missä  $A$  ja  $b$  ovat kertoimia, jotka valitaan taulukosta 4 (Eriksson ym. 1991: 19). Yhtälön mukaan, suuremmalta etäisyydeltä vaihejohtimeen asti kantautuva salamavirta on suurempi kuin lähempänä johdinta tapahtuva isku.

**Taulukko 4.** Vakiot, joista valitaan pari, jota käytetään virran laskemiseen yhtälössä 14 (Eriksson ym. 1991: 20; Hileman 1999: 226).

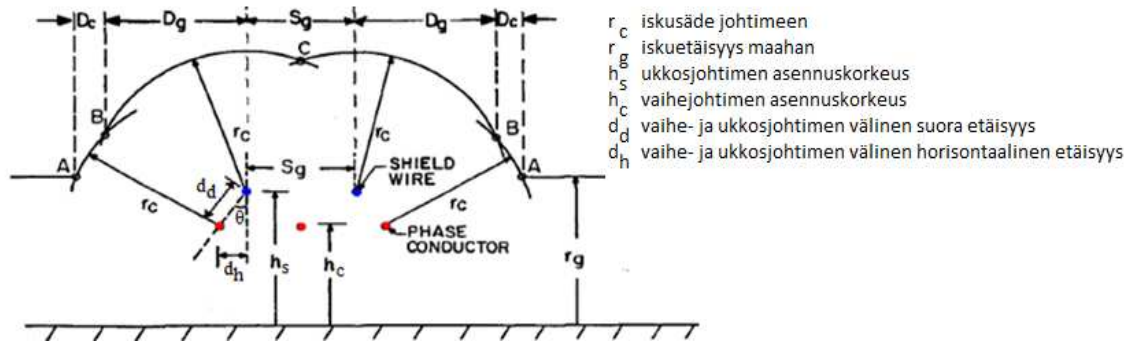
Source	$A$	$b$
Young, et al	(1)	0,32
Armstrong, Whitehead	6,7	0,80
Brown, Whitehead	7,1	0,75
Love	10,0	0,65
IEEE Working Group	8,0	0,65

Taulukon 4 kertoimet ovat suuruudeltaan hyvin lähellä toisiaan (poislukien lähteen Young, et al), niinpä käytettävän kerroinparin valinta lähinnä hienosäätää tulosta suuntaan tai toiseen. Muun muassa Cigren työryhmä käytti lähteen Brown-Whitehead kertoimia, sillä ne antavat kohtuullisia tuloksia (Hileman 1999: 226). Myös tässä työssä on käytetty kertoimia 7,1 ja 0,75. Kuvassa 25 on esitetty vielä graafisesti yleisimmin käytettyjen kerroinparien vaikutuksia iskuvirta-iskuetaisyys-riippuvuuteen.



**Kuva 25.** Salamavirran suhde iskuetäisyyteen (Hileman 199: 226).

Kuvassa 26 on esitettyä avojohtolinjan sähkögeometrisen malli. Suurimman iskuetäisyyden laskemiseksi riittää, että tiedetään asennuskorkeudet sekä ukkosjohtimelle ( $h_s$ ) että vaihejohtimelle ( $h_c$ ), kaksi parametria suorakulmaisen kolmion yhtälöstä, jotta saadaan laskettua vaihe- ja ukkosjohtimien välinen suora etäisyys ( $d_d$ ) ja horisontaalinen etäisyys ( $d_h$ ), sekä johtojen riippuma ( $d_{sag}$ ), jonka avulla lasketaan johtimien korkeuden keskiarvo.



**Kuva 26.** Avojohtolinjan sähkögeometrisen malli (Hileman 1999: 245).

Salaman suurin iskuetäisyys ( $d_{max}$ ) vaihejohtimeen määritetään kuvan 26 mittatiedoista

$$d_{max} = \frac{c^2(h_{s,avg} + h_{c,avg}) + 2 \cdot d_d \cdot d_h \sqrt{h_{s,avg} \cdot h_{c,avg}}}{2(h_{s,avg} - h_{c,avg})^2}, \quad (15)$$

missä  $h_{s,avg}$  on ukkosjohtimen- ja  $h_{c,avg}$  vaihejohtimen korkeuden keskiarvo (Brown 1978: 33). Yhtälön mukaan tiettyä iskuetäisyyttä  $d_{max}$  etäämmälle iskevät salamat osuvat joko maahan tai ukkosjohtimeen (Brown & Thunander 1976: 1572). Tällöin kuvan 26 janan  $D_c$  pituus on nolla (Aro 2003: 297).

Mikäli vaihe- tai ukkosjohtimen korkeuden keskiarvoa ei tiedetä, se voidaan selvittää johtimen asennuskorkeudesta pylväällä ja sen riippumasta jännevälin puolella välissä. Johtimen korkeuden keskiarvo  $h_{\text{avg}}$  (joko  $h_{c,\text{avg}}$  tai  $h_{s,\text{avg}}$ ) voidaan laskea

$$h_{\text{avg}} = h - \frac{2}{3}d_{\text{sag}}, \quad (16)$$

missä,  $h$  on johtimen korkeus pylväällä (joko  $h_c$  tai  $h_s$ ) sekä  $d_{\text{sag}}$  on johtimen riippuma (joko  $d_{c,\text{sag}}$  tai  $d_{s,\text{sag}}$ ) jännevälin puolella välissä (Eriksson ym. 1991: 26). Samaa yhtälöä voidaan siis käyttää sekä vaihejohtimen että ukkosjohtimen keskimääräisen korkeuden selvittämiseen.

### 7.2.2 Kriittinen salamavirta

Mikäli avojohtogeometria sallii avojohtolinjalle saapuvien salamavirtojen suuruuden riittävän suureksi, linjalla tapahtuu eristimien ylilyönti kriittisen virran ylittyessä. Ylilyönti siis rajoittaa virran korkeintaan kriittisen virran suuruiseksi. Tämä kriittinen salamavirta on raja-arvo, jota suuremmat virrat eivät täten teoriassa ole mahdollisia. Kriittinen salamavirta  $I_c$  saadaan laskettua kriittisen ylilyöntijännitteen  $U_{\text{cfo}}$  avulla

$$I_c = 2 \frac{U_{\text{cfo}}}{Z_1}, \quad (17)$$

missä  $Z_1$  on avojohtolinjan aaltoimpedanssi (Eriksson ym. 1991: 20). Huomataan, että kriittisen virran suuruuteen vaikuttaa Ohmin lain mukaan vain jännite ja impedanssi. Näiden lisäksi kerroin 2 on tärkeä, sillä se ottaa huomioon salamavirran jakautumisen tasan iskukohdasta johtimen kumpaankin suuntaan.

Kriittinen ylilyöntijännite ilmaeristeelle saadaan puolestaan yhtälöstä

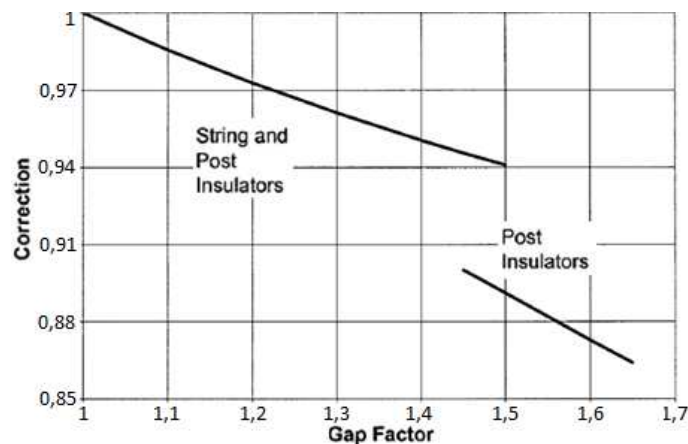
$$U_{\text{cfo}} = k \cdot 500 \cdot d, \quad (18)$$

missä  $k$  on elektrodien muodon huomioiva kerroin sekä  $d$  on elektrodien välinen etäisyys (Francisco ym. 2001: 96). Kerroin  $k$  määräytyy elektrodien tyypistä (Paris 1966: 936 - 937). Esimerkiksi johtimen ja tukirakenteen väliselle tapaukselle se on yleensä välillä 1,30 ja 1,50. Taulukossa 5 on muutkin kertoimet ilmaistuna.

**Taulukko 5.** Elektrodién muodon huomioiva kerroin  $k$  (Paris 1966: 941).

Impulsed	Electrodes Grounded	Factor $k$	
		Without String	With $I$ - and $V$ -string
Rod	plane	1.00	1.00
Rod	structure (under)	1.05	
Conductor	plane	1.15	
Conductor	window	1.20	1.15
Conductor	structure (under)	1.30	
Rod	rod ( $h = 3$ m, under)	1.30	
Conductor	structure (over and laterally)	1.35	1.30
Rod	rod ( $h = 6$ m, under)	1.40	1.30
Conductor	rope	1.40	
Conductor	rod ( $h = 3$ m, under)	1.65	
Conductor	crossarm end		1.50
Conductor	rod ( $h = 6$ m, under)	1.90	
Conductor	rod (over)	1.90	1.75

Mikäli elektrodién välissä on eristin, tulee kerrointa  $k$  korjata kuvan 27 mukaisesti.

**Kuva 27.** Kertoimen  $k$  korjauskerroin eristinketjulle ja tukieristimelle (Francisco ym. 2001: 97).

Korjauskerrointa joudutaan käyttämään eristimille muun muassa niiden vanhenemisen ja likaantumisen vuoksi. Tavallisesti noin 4 - 5 % korjaus riittää, ääritapauksissa jopa 20 % korjaaminen voi olla tarpeen (Francisco ym. 2001: 96).

Kun avojohtolinjan kriittinen salamavirta tiedetään, on sen yhteisvaikutusta arvioitava vaihejännitteen huippuarvon kanssa sekä positiivisella että negatiivisella jaksolla. Vaihejännitteen huippuarvon huomioiva salamavirta  $I_{c\pm}$  saadaan laskettua yhtälöstä

$$I_c^\pm = I_c \pm \frac{2 \cdot \hat{u}_p}{Z_1}, \quad (19)$$

missä  $I_c$  on kriittinen virta sekä  $\hat{u}_p$  on vaihejännitteen huippuarvo. Yhtälössä tarvittava vaihejännitteen huippuarvo saadaan laskettua suurimmasta käyttöjännitteestä  $U_m$  kertomalla se  $\sqrt{2}$ :lla huippuarvoksi ja jakamalla se  $\sqrt{3}$ :lla vaihejännitteeksi.

### 7.2.3 Salamaimpulssin rinnan nousuaika

Rinnan nousuaika saadaan laskettua jakamalla salamavirta (suurin tai kriittinen) salamavirran jyrkkyydellä avojohdon ja kaapelin liitynnässä. Salamavirran jyrkkyydeksi  $S_I$  avojohdon ja kaapelin liitynnässä saadaan

$$S_I = 2 \frac{S_U}{Z_1}, \quad (20)$$

missä  $S_U$  on salamajännitteen jyrkkyys. Yhtälössä 20 tarvittava salamajännitteen jyrkkyys avojohdon ja kaapelin liitynnässä lasketaan yhtälöllä

$$S_U = \frac{1}{K_{co} \cdot X + \frac{2}{S_I \cdot Z_1}}, \quad (21)$$

missä  $K_{co}$  on koronanvaimennuskerroin ja  $X$  on salamaimpulssin kulkumatka (Eriksson & Weck 1988: 6). Yllä olevan yhtälön mukaan pidempi kulkumatka tai suurempi koronanvaimennuskerroin johtaa pienempään jännitteen jyrkkyyteen. Toisaalta Ohmin lain mukaan suurempi virran jyrkkyys tai aaltoimpedanssi johtaa suurempaan jännitteen jyrkkyyteen. Yhtälössä käytetty koronan vaimennuskerroin  $K_{co}$  valitaan taulukosta 6 avojohtolinjan johtimien lukumäärän mukaan.

**Taulukko 6.** Koronanvaimennuskerroin  $K_{co}$  (IEC 60071-2: 175).

Conductor configuration	$K_{co}$ ( $\mu s/(kV \cdot m)$ )
Single conductor	$1,5 \times 10^{-6}$
Double conductor bundle	$1,0 \times 10^{-6}$
Three or four conductor bundle	$0,6 \times 10^{-6}$
Six or eight conductor bundle	$0,4 \times 10^{-6}$



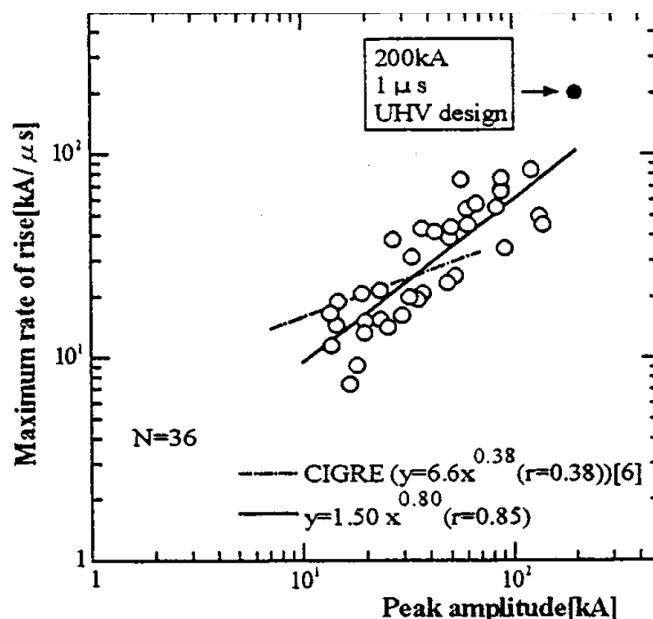
Yhtälössä 21 käytetty salamavirran suurin jyrkkyys iskupaikalla saadaan laskettua erikseen sekä ensimmäiselle että sitä seuraaville salamaniskuille yhtälöillä 22 ja 23. Ensimmäisen salamaniskun virran suurimmaksi jyrkkyydeksi  $S_{I,1}$  saadaan

$$S_{I,1} = 3,9 \cdot I_{\max}^{0,5} \quad (22)$$

ja sitä seuraavien salamaniskujen virran suurimmaksi jyrkkyydeksi  $S_{I,2}$  saadaan

$$S_{I,2} = 3,8 \cdot I_{\max}^{0,93} \quad (23)$$

(Anderson & Eriksson 1980: 95). Kuten edellä mainituista kokeellisesti määritetyistä kaavoista huomataan, jälkimmäiset salamaniskut ovat jyrkempiä ja täten vain niiden vaikutuksen arvioiminen ja käyttäminen salamajännitteen jyrkkyyden määrittämiseen riittää, kun etsitään pahinta mahdollista tilannetta. Kuvassa 28 on esitettyä esimerkki suurimman salamavirran suhteesta suurimpaan salamavirran jyrkkyyteen.



**Kuva 28.** Salamavirran jyrkkyyden suhde salamavirtaan (Tomomi ym. 2000: 433).

#### 7.2.4 Selän puoliarvonaika

Standardin mukaan salamaimpulsseille voidaan käyttää selän puoliarvonaikaa  $T_2 = 140 \mu s$  (IEC 60071-2: 179).

### 7.3 Takaisku

Takaisku aiheutuu salamaniskusta pylvään maadoitettuun osaan kuten ukkosjohtimeen tai orteen, jolloin pylvästä maahan kulkeva virta aikaansaa pylvään impedanssin ja maaimpedanssin yhteisvaikutuksesta potentiaalin pylvälle. Pylvään potentiaalin noustessa riittävästi, tapahtuu ylilyönti eristimen maadoitetulta puolelta vaihejohtimen puolelle. (IEC 60099-5: 24.) Liitteessä 3 on esitetty seuraavia yhtälöitä soveltavat laskutoimitukset esimerkkitapauksen arvoja käyttäen.

#### 7.3.1 Takaiskun aiheuttava minimivirta

Takaiskun aiheuttaman vähiten kriittisen ylijännitetilanteen määrittämiseksi on aluksi selvitettävä salamaniskulta tarvittava minimivirta, joka saa eristimen lyömään yli. Takaiskun aiheuttava pienin salamavirta  $I_{\min}$  saadaan yhtälöstä

$$I_{\min} = \frac{U_{cfo} \left(1 + \frac{2}{\tau_r}\right) - \hat{u}_p}{(1 - c_f) R_f}, \quad (24)$$

missä  $\tau_r$  on laskevan pulssin aikavakio,  $\hat{u}_p$  on vaihejännitteen huippuarvo,  $c_f$  on kytkentäkerroin sekä  $R_f$  on pylvään maadoitusresistanssi (Eriksson & Weck 1988: 5). Kytkentäkerroin  $c_f$  on 0,15 p.u. yhdellä ukkosjohtimella varustetulle avojohtolinjalle ja 0,35 p.u. kahdella ukkosjohtimella varustetulle avojohtolinjalle (IEC 60071-2: 179).

Yhtälössä 24 käytetty aikavakio  $\tau_r$  saadaan laskettua yhtälöllä

$$\tau_r = \frac{Z_e \cdot L_{sp}}{R_f \cdot c_0}, \quad (25)$$

missä  $Z_e$  on ukkosjohtimen aaltoimpedanssi,  $L_{sp}$  on pylväiden jänneväli sekä  $c_0$  on valonnopeus ( $300 \cdot 10^6$  m/s) (Eriksson & Weck 1988: 5; IEC 60071-2: 181).

#### 7.3.2 Takaiskun maksimivirta

Minimivirtatarkastelun lisäksi on hyvä tehdä rinnakkainen tarkastelu oletettavalla maksimivirralla, jotta voidaan vertailla minimi ja maksimi takaiskujännitteitä ja niiden

jyrkkyyksiä sekä vaikutuksia GIS-kojeistossa. On selvää, että vain harva takaiskun aiheuttava salamavirta tulee olemaan juuri minimivirran suuruinen. Näin ollen myös oletettavalle maksimivirralla on tehtävä laskutoimitukset ja simulointi. Elahin ym. (1990) keräämän tutkimustiedon mukaan salamavirran huippuarvo voi yltää jopa 200 kA saakka. Tämä tulee olemaan myös esimerkkitapauksen simuloinneissa käytettävä maksimivirta.

Esimerkkitapauksen ensimmäiseen maksimivirralla suoritettavaan simulointiajioon käytetään samoja salamaimpulssigeneraattoriin syötettäviä pulssin muodon määrittäviä kertoimia kuin minimivirran tapaukseen, jolloin saadaan minimivirtatapausta huomattavasti jyrkempi pulssi, kun sekä rinnannousuaika että selän puoliarvonaika ovat samat mutta pulssin amplitudi on huomattavasti korkeampi. Toisessa maksimivirran tapauksessa on minimivirran simuloinneista saatu pulssi skaalattu sekä pituus että leveys-suunnassa maksimivirran ja minimivirran suuruuden välisellä kertoimella, jolloin pulssin muoto säilyy.

### 7.3.3 Salamaimpulssin rinnan nousuaika

Rinnan nousuaika saadaan laskettua jakamalla salamajännite salamajännitteen jyrkkyydellä avojohdon ja kaapelin liittynässä. Huomataan, että mitä pidempi kulkumatka aallolla on tai mitä suurempi koronanvaimennuskerroin johtimella on, sitä pienempi tulee jännitteen jyrkkyys olemaan. Tämän lisäksi mitä suurempi takaiskuvirta ja täten takaiskujännite on, sitä jyrkempi tulee ylijänniteimpulssi avojohdon ja kaapelin liittynässä olemaan. Takaiskuvirran aiheuttamaa jännitteen jyrkkyyttä  $S_{U,b}$  kaapeli-liittynässä voidaan arvioida yhtälöllä

$$S_{U,b} = \frac{1}{K_{co} \cdot L_{sp} + \frac{T_{fr}}{U_b}}, \quad (26)$$

missä  $T_{fr}$  on nousevan pulssin kesto aika (käytetään IEEE:n suosittelemaa arvoa 0,5  $\mu$ s) sekä  $U_b$  on takaiskuvirran aiheuttama jännite eristimen yli, mikä lasketaan yhtälöllä

$$U_b = I_b(1 - c_f)R_f + \hat{u}_p, \quad (27)$$

missä  $I_b$  on takaiskuvirta (Eriksson & Weck 1988: 5). Tämä yhtälö ottaa huomioon takaiskuvirran ja pylvään maadoitusresistanssin tulon lisäksi kytkentäkertoimen ja eristimen asennuspaikalla jo vaikuttavan jännitteen (IEEE C62.22 2009: 112). Kytkentäkertoimenä käytetään IEC-standardin mukaisia arvoja (ks. yhtälö 24).

#### 7.3.4 Selän puoliarvonaika

Kertomalla yhtälöllä 25 lasketun eksponentiaalisesti vaimenevan pulssin selän aikavakiota  $\tau_r \ln 2$ :lla saadaan vaimenemisen kesto aika  $T_r$ . Näin ollen laskevan aallon kesto aika on summattava standardin mukaiseen nousuaikaan  $T_1$ , jotta saadaan standardin mukainen puoliarvon aika  $T_2$ . (Eriksson ym. 1991: 15.)

#### 7.4 Ylijännitesuojan energianpurkaustarve

Ylijännitesuojan energianpurkaustarve on tärkeä tekijä tehokkaan ja luotettavan suojauksen määrittämisessä. Energianpurkaustarve on laskettava, jotta sitä voidaan verrata asennettavan suojan energianpurkauskyyyn. Standardin mukaan, salama- ylijännitteen aiheuttamaa metallioksidisuojan energianpurkaustarvetta  $W$  voidaan arvioida yhtälöllä

$$W = \left( 2 \cdot U_{cfo} - N \cdot U_{pl} \left( 1 + \ln \frac{2 \cdot U_{cfo}}{U_{pl}} \right) \right) \frac{U_{pl} \cdot t}{Z_1}, \quad (28)$$

missä  $N$  on suojattavien linjojen lukumäärä,  $U_{pl}$  on suojan salamasyöksyjännitteen suojaustaso sekä  $t$  on salamaimpulssin kesto aika (käytetään 0,3 ms) (IEC 60099-5: 42 - 43). Yllä olevan yhtälön antamaa tulosta verrataan suojan valmistajan ilmoittamaan energianpurkauskyyyn. Mikäli valmistajan ilmoittama purkauskyy ei ylitä, on suojalla täydet edellytykset säilyä ehjänä kyseisestä salamaniskusta. Liitteessä 4 on esitetty esimerkkitapauksen ylijännitesuojien energianpurkaustarpeen määrittämiseen liittyvä laskutoimitus.

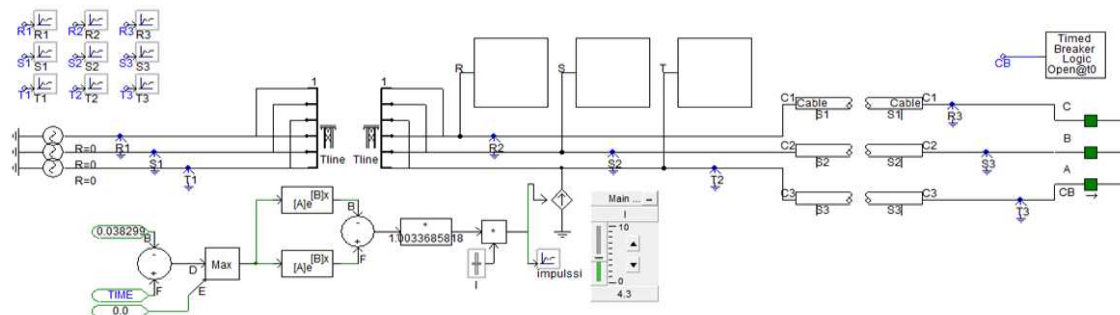
## 7.5 Simulointimalli

Simulointi on keskeisessä osassa asemalle tulevien ylijännitteiden määrittämisessä. Aluksi selvitetään edellä esitettyjen kappaleiden 7.2 - 7.4 mukaisesti simuloinnissa tarvittavat impulssivirrat, rinnan nousuajat, puoliarvonajat ja suojien energianpurkaustarve. Kun nämä tiedetään, voidaan tutkittava tapaus mallintaa ja simuloida. Sekä suora salamanisku että takaisku voidaan impulssien muodoista riippuen simuloida samalla mallilla, sillä kaikki kappaleissa 7.2 - 7.4 lasketut arvot on määritetty suoraan kaapelipääteelle. Täten ainoastaan salamaimpulssien muotojen muuttaminen riittää kattamaan kaikki työssä simuloitavat tilanteet. Esimerkkitapauksessa simuloinnin aika-askeleena on käytetty arvoa  $0,1 \mu\text{s}$ , mikä antaa tuloksille riittävän tarkkuuden.

### 7.5.1 Lähtökohdat ja -tiedot

Simuloinnin lähtökohtana oletetaan, että asemalle liittyvien avojohtolinjojen sähkögeometriset mallit on käyty läpi siten, että on löydetty suurimman salamavirran mahdollistava avojohtolinja, joka mallinnetaan pahimpana tapauksena. Lisäksi oletetaan, että tälle avojohtolinjalle on laskettu tarvittavat impulssivirrat, rinnan nousu- ja puoliarvonajat, joita käytetään mallin salamaimpulssigeneraattorissa, jotka määräävät mallissa käytettävän impulssin muodon ja suuruuden.

Kuvassa 29 esitetty simulointimalli koostuu kaksinkertaisesta avojohtolinjasta (kaksi johdinta per vaihe) ja sitä syöttävästä ideaalisesta vaihtojännitelähteestä, kolmesta metallioksidisuojamoduulista, yhdyskaapelista, jatkuvasti avoinna olevasta katkaisijasta sekä tarkasti ajoitetusta salamaimpulssigeneraattorista.

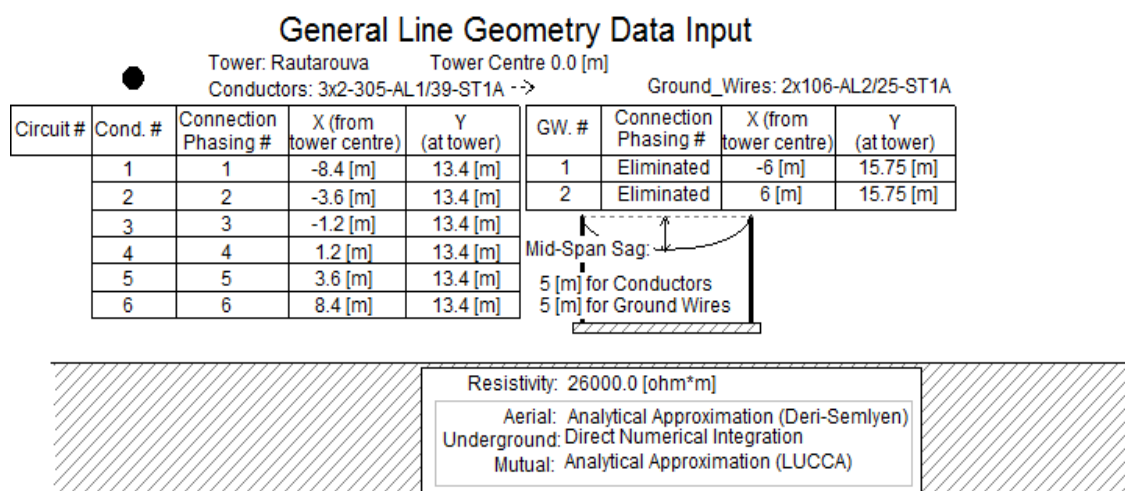


**Kuva 29.** Simulointimalli.

### 7.5.2 Avojohtolinja

Avojohdolle on käytetty 1920-luvulla rakennetun Rautarouva-pylvään rakennetta, sillä sen rakenne mahdollistaa esimerkkitapauksen asemalle kaikista tulevista avojohtolinjoista suurimmat salamaniskuvirrat. Rautarouvan kannattelemaks vaihejohtimeksi on oletettu kaksinkertainen ACSR Duck-johdin jännitetasolla 110 kV ja ukkosjohtimiksi AACSR Sustrong. Avojohtolinjaa on mallinnettu syöttöpuolelle 22,06 km verran, eli seuraavaan haaraan saakka, jonne asti vaihejohtimien aaltoimpedanssi pysyy muuttumattomana.

Kuvan 30 mukaan Rautarouva-pylvään rakenne on mallinnettu syöttämällä X- ja Y-koordinaatteina sekä vaihe- että ukkosjohtimien paikat, sillä ohjelman kirjastossa ei tämän tyyppistä rakennetta ollut valmiina.



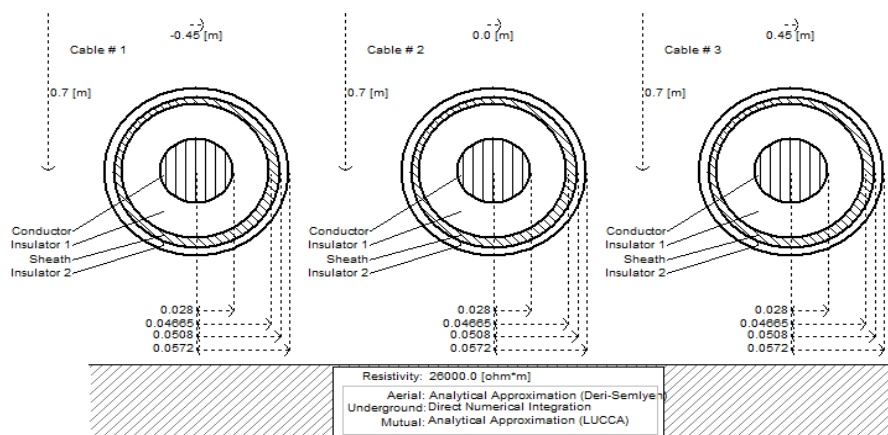
**Kuva 30.** Mallinnetun avojohtolinjan parametrit.

Esimerkkiasemaan liittyvien mittauksien perusteella maan keskimääräinen resistiivisyys avojohtojen alla vaihtelee välillä harjusora 26000  $\Omega\text{m}$  ja savi 130  $\Omega\text{m}$ . Simuloinnilla saatujen tuloksien perusteella maa-aineksen resistiivisyyden vaikutus katkaisijan ylijännitteen huippuarvoon on erittäin pieni. Toisaalta resistiivisyyden pienentäminen pienentää katkaisijassa vaikuttavan ylijännitteen heilahtelua. Näin ollen simuloitavassa mallissa käytetään mahdollisimman huonosti johtavaa vaihtoehtoa eli harjusoraa.

### 7.5.3 Maakaapeli

Esimerkkitapauksen GIS-kojeiston ja avojohtolinjan välille on mallinnettu 130 m pitkä 2000 mm<sup>2</sup> koaksiaaliekuparikaapeli. Sen sisäjohtimen resistanssiksi on valmistajien taulukoista valittu arvo 0,009 Ω/km, mikä vastaa resistiivisyydeltään noin  $0,0022167 \cdot 10^{-6}$  Ωm, ja metallivaipan resistanssiksi valittu arvo 2,15 Ω/km, mikä vastaa resistiivisyydeltään noin  $0,27305 \cdot 10^{-6}$  Ωm. Suhteellisen permeabiliteetin oletetaan olevan 1 ja suhteellisen permittiivisyyden oletetaan olevan 2,3. Kaapelit on kaivettu 0,7 m syvyyteen ja ne on sijoitettu 0,45 m etäisyydelle toisistaan.

Kuvan 31 mukaan mallinnettu koaksiaalikaapeli koostuu kuparisesta sisäjohtimesta, XLPE-eristeestä (ristisilloitettu polyeteeni), metallipunotusta suojavaipasta sekä polyeteenistä valmistetusta ulkokuoresta. Kunkin kerroksen säde on esitetty kuvassa 31. Maan resistiivisyyden oletetaan olevan sama 26000 Ωm kuin avojohtolinjallakin.



**Kuva 31.** Mallinnetun maakaapelin parametrit.

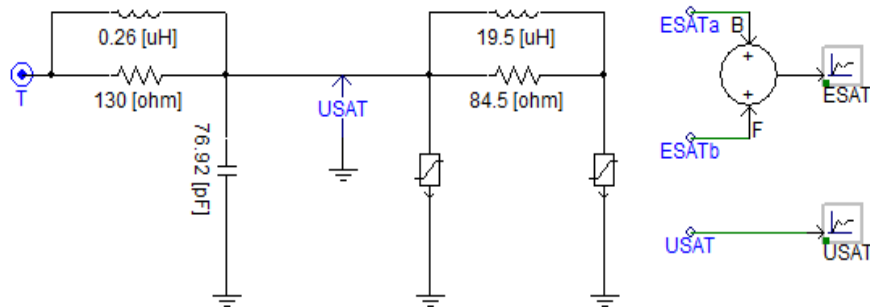
### 7.5.4 GIS-kojeisto ja katkaisija

Kojeistovalmistajan mukaan esimerkkitapauksen GIS-kojeiston salamasyöksyjännitteen kestotaso on 550 kV ja täten varmuuskerroin ( $K_s = 1,15$ ) huomioon otettuna 479 kV. Katkaisija on mallinnettu 3-vaiheisena, ja sen oletetaan olevan avoinna koko simuloinnin ajan. Simulointiohjelman ominaisuuksien vuoksi on katkaisijalle jouduttu antamaan resistanssi sen ollessa auki. Ideaalitapauksessa avonainen katkaisija vastaa ääretöntä resistanssia, mutta ohjelman kannalta 1 MΩ riittää.

### 7.5.5 Ylijännitesuoja

Esimerkkitapauksessa käytetyn Pexlim R132-YV123 -ylijännitesuojan nimellisjännite on valmistajan mukaan 132 kV, suurin käyttöjännite 123 kV, suurin jatkuva käyttöjännite 78 kV, jäännösjännite 342 kV ja energianpurkauskyyky 673 kJ. Liitteessä 4 on laskettu kappaleen 7.4 mukaisesti esimerkkitapauksessa tarvittavan suojan energianpurkauskyyky, joksi saatiin 473,8 kJ, joka on selvästi alle valmistajan ilmoittaman energianpurkauskyyvyn. Täten suojan käyttö on mahdollista kyseisessä tapauksessa.

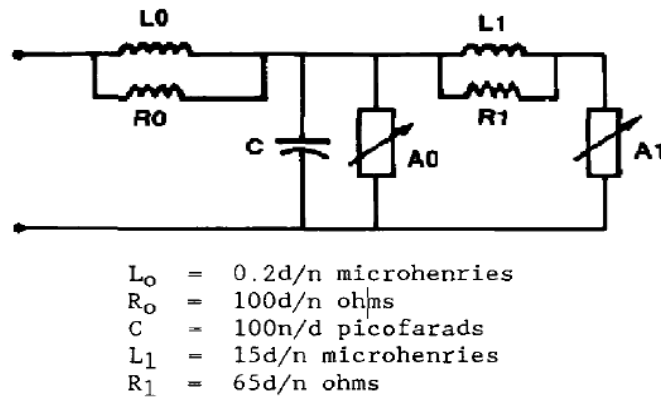
Tilan säästämiseksi ja selkeyden säilyttämiseksi kunkin vaiheen ylijännitesuoja on mallinnettu omana erillisenä moduulinaan. Kuvassa 32 on esitetty T-vaiheen ylijännitesuojan moduulin sisältö. Se rakentuu vaiheen ja maan välillä vaikuttavista epälineaarista vastuksista, niiden välisestä RL-suotimesta, hajakapasitanssista sekä suojan välittömässä läheisyydessä vaikuttavasta magneettikentästä, jota niin ikään kuvataan RL-piirinä (IEEE WG 3.4.11 1992: 303 - 304).



**Kuva 32.** Mallinnetun ylijännitesuojamoduulin rakenne (T-vaihe).

PSCADin epälineaaristen vastusten mallit käyttävät oletuksena Asean XAP-A metallioksidivastusten virta- ja jänniteominaisuuksia, täten ainoa niihin syötettävä tieto on suojan nimellisjännite, joka esimerkkitapauksessa on 132 kV. Muut suojamoduulin parametrit on määritetty IEEE työryhmän suosituksien perusteella kuvan 33 mukaisesti, jossa  $d$  on suojan pituus metreinä (esimerkkitapauksessa 1,3 m) ja  $n$  on rinnakkaisten vastusblokkipilareiden lukumäärä (esimerkkitapauksessa 1 kpl).



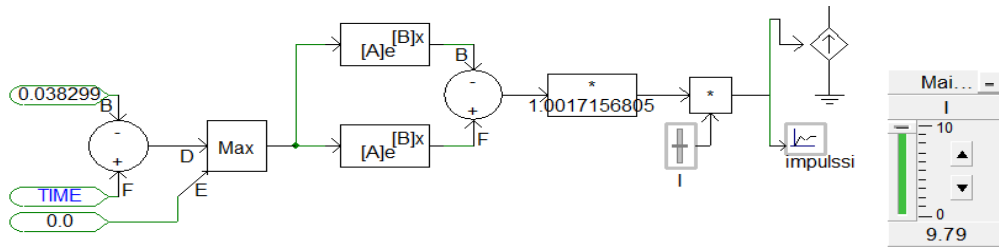


**Kuva 33.** Ylijännitesuojamoduulin parametrien määrittäminen (IEEE WG 3.4.11 1992: 303-304).

Työn ylijännitesuojamallin kutakin parametria vuorollaan jakamalla tai kertomalla kymmenellä, ei ylijännitteen muoto tai huippuarvo muuttunut juuri ollenkaan. IEEE työryhmän tekemän tutkimuksen mukaan, edellä mainituista parametreista suurin vaikutus on epälineaaristen vastusten välissä olevan RL-suotimen induktanssilla, muiden parametrien muuttaminen suuntaan tai toiseen ei juuri vaikuta tuloksiin (IEEE WG 3.4.11 1992: 304). Kuten olettaa saattaa, suurin vaikutus on ylijännitesuojilla ja niiden nimellisjännitteellä, mutta myös suojien VI-käyttäytymisellä, jota ei tässä työssä muutettu.

#### 7.5.6 Salamaimpulssigeneraattori suoralle salamaniskulle

Suoralle salamaniskulle käytetään kuvan 34 mukaista salamaimpulssigeneraattoria. Mallissa käytettyjen impulssien muodot määritetään summaimeen menevien eksponenttilohkojen parametreilla  $k_1$  ja  $k_2$ . Summan amplitudi korjataan huippuarvoltaan yhden kiloampeerin suuruiseksi korjauskertoimella  $k_i$ , jonka jälkeen kokonaisuuden huippuarvoa voidaan yksikertaisesti säätää virralla  $I$ . Kuvassa 34 on esitetty 0,31/140-pulssin generaattori, joka syöttää malliin huippuarvoltaan 9,79 kA suuruisen impulssin ajanhetkellä  $t = 0,038299$  s, joka vastaa aikaa, jolloin kyseistä vaihetta syöttävän lähteen jännite on saavuttanut jatkuvan tilan positiivisen huippuarvon iskupaikalla.



**Kuva 34.** Mallinnettu salamaimpulssigeneraattori suoralle salamaniskulle.

Kuvan 34 mallin toiminta perustuu yhtälöön

$$i_{1kA}(t) = k_i(e^{-k_1 \cdot t} - e^{-k_2 \cdot t}), \quad (29)$$

missä  $i_{1kA}(t)$  on huippuarvoltaan 1 kA suuruinen virtaimpulssi,  $k_i$  on virtaimpulssin suuruuden korjauskerroin,  $k_1$  on impulssin puoliarvonaikaan vaikuttava parametri,  $k_2$  on impulssin nousuaikaan vaikuttava parametri sekä  $t$  on aika. Yhtälön antamaa yksikköimpulssia kerrotaan virralla  $I$  halutunlaisen kokonaisuuden aikaansaamiseksi. Simuloinnissa tarvittavat parametrit  $k_i$ ,  $k_1$  ja  $k_2$  on määritetty kullekin simuloitavalle pulssille kokeellisesti. Taulukossa 7 on esitetty esimerkkitapauksessa käytettyjen parametrien arvot, joilla saadaan halutunlainen impulssi. Rinnan nousuajat, selän puoliarvonaikat sekä virrat on määritetty kappaleen 7.2 mukaisesti.

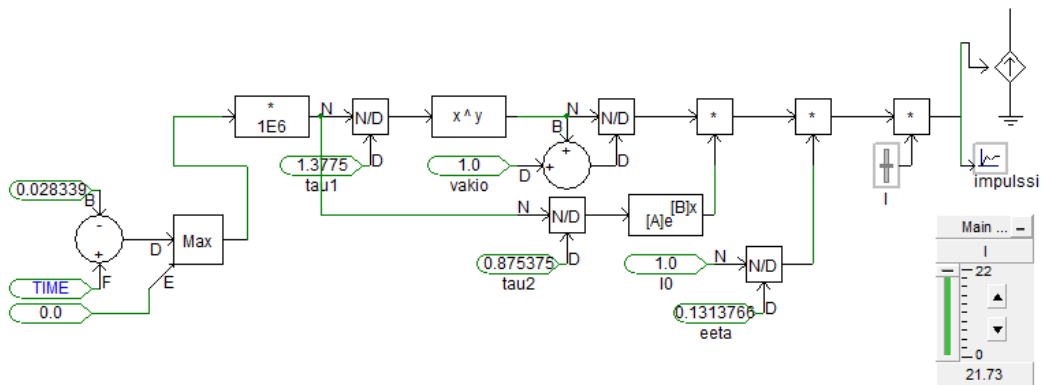
**Taulukko 7.** Salamaimpulssigeneraattorin kertoimia suoralle salamaniskulle.

$t$ (s)	$T_1$ (μs)	$T_2$ (μs)	$k_1$	$k_2$	$k_i$	$I$ (kA)
0,038299	0,31	140	4963,3	27900000	1,001715681	9,79
0,028339	0,31	140	4963,3	27900000	1,001715681	9,79
0,028339	0,6	140	4975,8	13140000	1,003368582	5,2
0,038299	0,49	140	4970,6	16565000	1,002738577	4,3

Suoran salamaniskun suurimman virran pulssi on simuloitu sekä positiivisen että negatiivisen jakson huipulla tapahtuvaksi. Suoran salamaniskun kriittisellä virralla tapahtuvat pulssit on ajoitettu tapahtuvaksi huippuarvoilla, toinen negatiivisen jakson minimissä ja toinen positiivisen jakson maksimissa. Esimerkkitaupaukseen liittyvät tapauskohtaiset salamaimpulssimuodot on esitetty liitteessä 5.

### 7.5.7 Salamaimpulssigeneraattori takaiskulle

Takaiskulle jouduttiin tekemään oma salamaimpulssigeneraattorinsa, sillä suoran salamaniskun generaattorin malli ei taipunut takaiskulle tyypilliseen lyhyeen puoliarvonaikaan. Kuvassa 35 on esitetty 1,60/2,38-pulssin generaattori, joka syöttää malliin huippuarvoltaan 21,73 kA suuruisen impulssin ajanhetkellä  $t = 0,028339$  s. Suoran salamaniskun tapauksen tavoin, takaiskun iskuaikaa on viivästetty ajalla, joka vastaa aikaa, jolloin kyseistä vaihetta syöttävän lähteen jatkuvan tilan arvo on saavuttanut negatiivisen jakson huipun. Yhtälön antamaa yksikköimpulssia kerrotaan virralla  $I$  halutunlaisen kokonaisuuden aikaansaamiseksi.



**Kuva 35.** Mallinnettu salamaimpulssigeneraattori takaiskulle.

Kuvan 35 mallin toiminta perustuu yhtälöön

$$i_{1kA}(t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^n}{1+(t/\tau_2)^n} e^{-\frac{t}{\tau_2}}, \quad (30)$$

jossa  $i_{1kA}(t)$  on huippuarvoltaan 1 kA suuruinen virtaimpulssi,  $I_0$  on virtaimpulssin huippuarvo (1),  $\eta$  on huippuarvon korjauskerroin,  $t$  on aika,  $\tau_1$  on rinnan nousun aikavakio,  $\tau_2$  on selän puoliarvon aikavakio sekä  $n$  on virran jyrkkyysskerroin (minimivirralla 10, maksimivirralla 5 ja 10) (Heidler 1985). Simuloinnissa tarvittavat kertoimet  $\eta$ ,  $\tau_1$  ja  $\tau_2$  on määritetty kokeellisesti kullekin takaiskun tapaukselle. Taulukossa 8 on esitetty esimerkitapauksessa käytettyjen kertoimien arvot, joilla saadaan halutunlainen impulssi. Rinnan nousuajat, selän puoliarvonajat sekä virrat on määritetty kappaleen 7.3 mukaisesti.

**Taulukko 8.** Salamaimpulssigeneraattorin kertoimia takaiskulle.

$t$ (s)	T1 ( $\mu$ s)	T2 ( $\mu$ s)	$\tau_1$	$\tau_2$	$\eta$	$n$	$I$ (kA)
0,028339	1,6	2,38	1,13775	0,875375	0,1313766	10	21,73
0,028339	1,6	2,38	1,13775	0,875375	0,1313766	10	200
0,028339	14,66	21,86	15,076	5,475	0,03196315	5	200

Kaikki takaiskun pulssit on laskettu ja ajoitettu tapahtuvaksi syöttävän lähteen negatiivisella jaksolla. Esimerkkitapaukseen liittyvät tapauskohtaiset salamaimpulssimuodot on esitetty liitteessä 5.

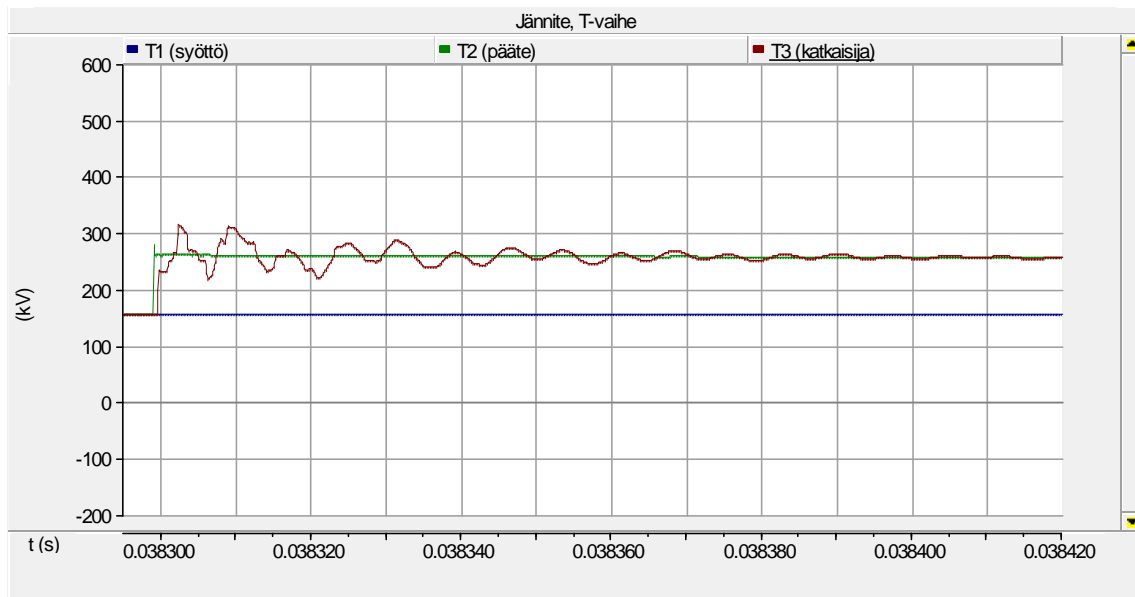
## 7.6 Simuloinnin tulokset

Simuloinnin tulokset ovat hyvin toisistaan poikkeavia. Niistä nähdään kuinka salamaimpulssin rinnan nousuaika ja selän puoliarvonaika vaikuttaa GIS-kojeiston katkaisijassa ilmenevän ylijännitteen muotoon. Mitä jyrkempi simuloitu salamaimpulssi on, sitä jyrkempi siitä aiheutuva ylijännite on. Lisäksi takaiskun 200 kA tapauksia vertailemalla nähdään kuinka salamaimpulssin muoto vaikuttaa lähinnä vain ylijännitteen amplitudin suuruuteen, eikä niinkään sen muotoon. Näin ollen salamaimpulssin amplitudi lienee tärkein muuttuja ylijännitteitä määritettäessä.

### 7.6.1 Suora salamanisku

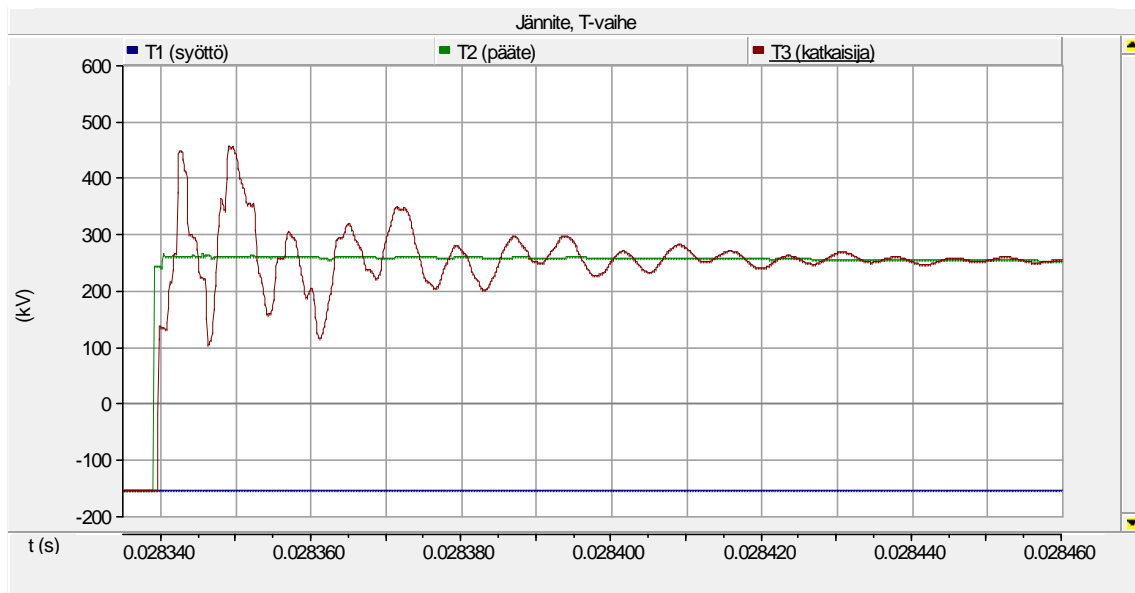
Kuvissa 36 - 39 on esitettynä kaikki suoran salamaniskun simulointitilanteet ja niihin liittyvät jännitemittaukset. Sininen kuvaaja edustaa mallia syöttävän vaihtojännitelähteen jännitettä, vihreä kuvaaja edustaa kaapelipääteessä esiintyvää jännitettä ja punainen kuvaaja edustaa jännitettä GIS-kojeiston avoimessa katkaisijassa. Kuvaajien keskinäisen vertailun helpottamiseksi, kaikissa kuvaajissa on käytetty 125  $\mu$ s aikaikkunaa sekä Y-akselin minimiarvoa - 200 kV ja maksimiarvoa 600 kV. Tuloksista nähdään kuinka kaikki simulointitapaukset ovat värähtelyn jaksollisuudeltaan lähes identtiset, ainoastaan niiden nousujyrkkyydet, huippuamplitudit ja täten myös vaimenemiset eroavat toisistaan.

Kuvassa 36 esiintyvä suurin jännite GIS-kojeiston katkaisijassa on 319,2 kV.



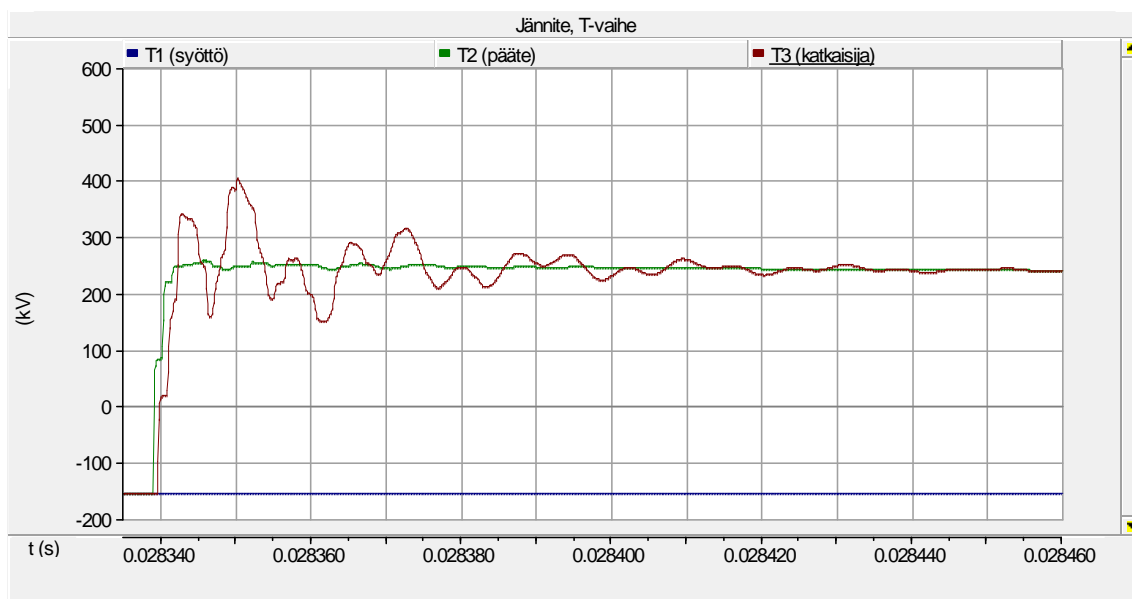
**Kuva 36.** Simulointiajon jännitteenmittaukset, kun suoran salamaniskun  $0,31/140 \mu\text{s}$ ,  $9,79 \text{ kA}$  -pulssi on ajoitettu syöttöjännitteen positiivisen jakson maksimiin.

Kuvassa 37 esiintyvä suurin jännite GIS-kojeiston katkaisijassa on 463,7 kV.



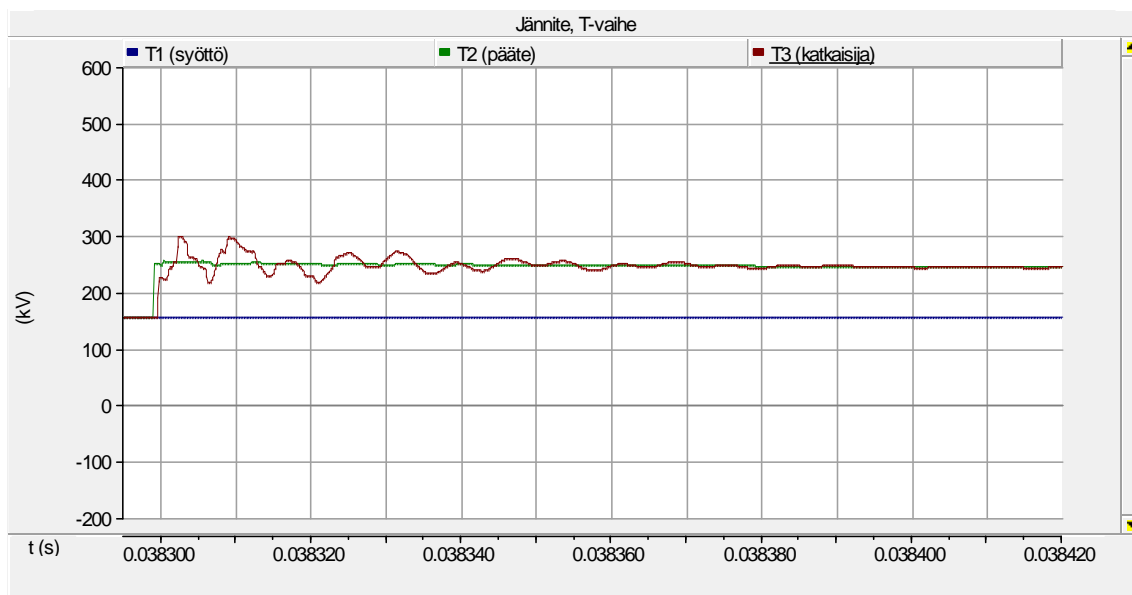
**Kuva 37.** Simulointiajon jännitteenmittaukset, kun suoran salamaniskun  $0,31/140 \mu\text{s}$ ,  $9,79 \text{ kA}$  -pulssi on ajoitettu syöttöjännitteen negatiivisen jakson minimiin.

Kuvassa 38 esiintyvä suurin jännite GIS-kojeiston katkaisijassa on 410,5 kV.



**Kuva 38.** Simulointiajon jännitteenmittaukset, kun suoran salamaniskun  $0,6/140 \mu\text{s}$ ,  $5,2 \text{ kA}$  -pulssi on ajoitettu syöttöjännitteen negatiivisen jakson minimiin.

Kuvassa 39 esiintyvä suurin jännite GIS-kojeiston katkaisijassa on 299,2 kV.



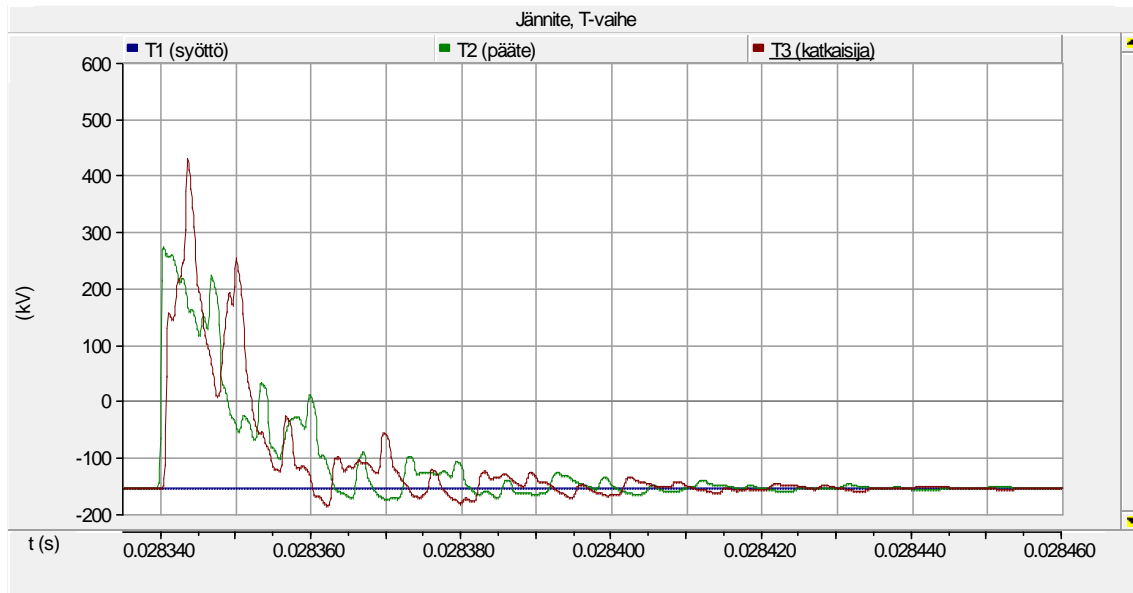
**Kuva 39.** Simulointiajon jännitteenmittaukset, kun suoran salamaniskun  $0,49/140 \mu\text{s}$ ,  $4,3 \text{ kA}$  pulssi syöttävän jännitteen positiivisen jakson maksimiin.

### 7.6.2 Takaisku

Kuvissa 40 - 42 on esitettyä kaikki takaiskun simulointitilanteet ja niihin liittyvät jännitemittaukset. Sininen kuvaaja edustaa mallia syöttävän vaihtojännitelähteen jännitettä, vihreä kuvaaja edustaa kaapelipääteessä esiintyvää jännitettä ja punainen kuvaaja edustaa jännitettä GIS-kojeiston avoimessa katkaisijassa. Kuvaajien keskinäisen vertailun helpottamiseksi, on kaikissa kuvaajissa käytetty 125  $\mu$ s aikaikkunaa sekä Y-akselin minimiarvoa - 200 kV ja maksimiarvoa 600 kV.

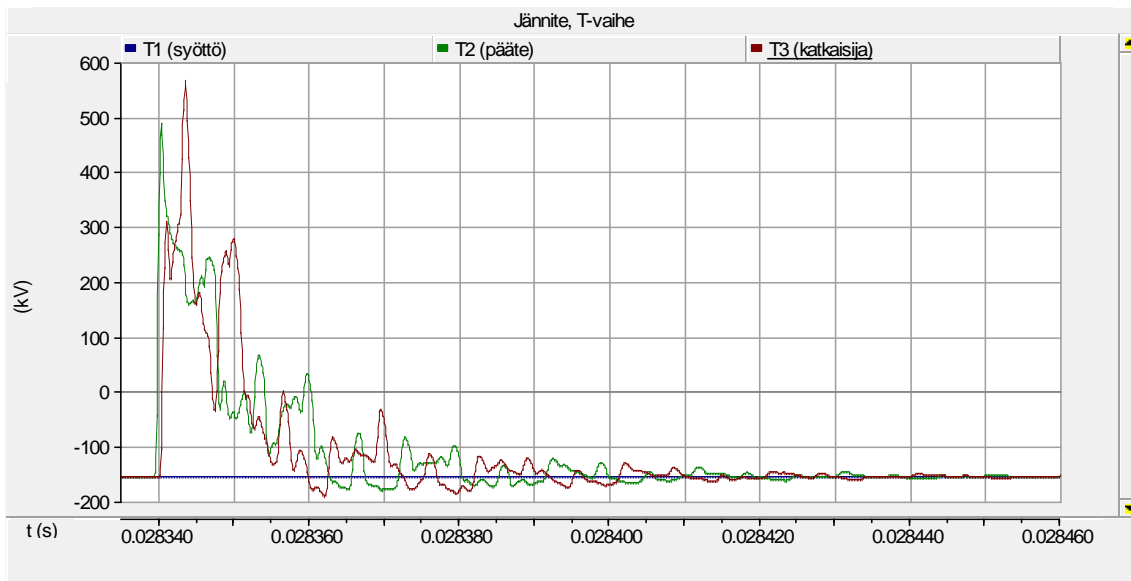
Suorasta salamaniskusta poiketen mitään selvään värähtelyn jaksollisuutta ei ole havaittavissa. Kuvien 40 ja 41 tulokset muistuttavat toisiaan sillä salamaimpulssi on muodoltaan sama. Toisen salamaimpulssin amplitudi on 9,2-kertainen toiseen nähden (200 kA vs 21,73 kA), mutta ylijännitteen amplitudi ainoastaan 1,3-kertainen (567,8 kV vs 430,1 kV). Lisäksi kuvia 41 ja 42 vertailemalla havaitaan, että kahden täysin samansuuruisen (200 kA) mutta hyvin erimuotoisen salamaimpulssin aiheuttama ylijännite GIS-kojeiston katkaisijassa on käytännössä sama (567,8 kV vs 567,5 kV).

Kuvassa 40 esiintyvä suurin jännite GIS-kojeiston katkaisijassa on 430,1 kV.



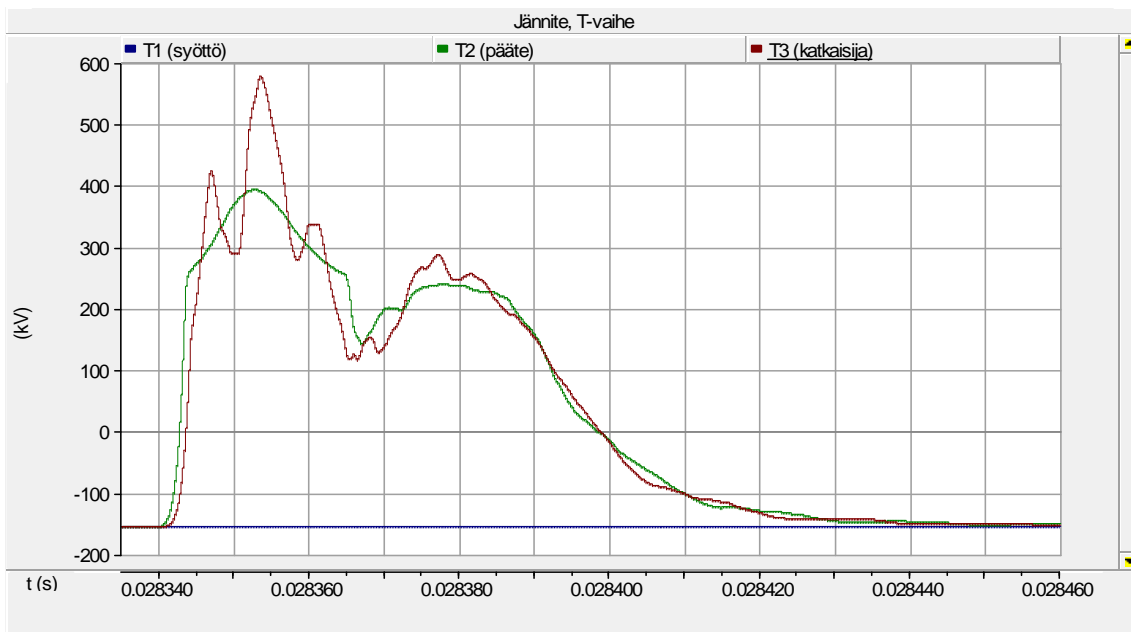
**Kuva 40.** Simulointiajon jännitteenmittaukset, kun takaiskun 1,6/2,38  $\mu$ s, 21,73 kA -pulssi on ajoitettu syöttöjännitteen negatiivisen jakson minimiin.

Kuvassa 41 esiintyvä suurin jännite GIS-kojeiston katkaisijassa on 567,8 kV.



**Kuva 41.** Simulointiajon jännitteenmittaukset, kun takaiskun 1,6/2,38  $\mu$ s, 200 kA -pulssi on ajoitettu syöttöjännitteen negatiivisen jakson minimiin.

Kuvassa 42 esiintyvä suurin jännite GIS-kojeiston katkaisijassa on 567,5 kV.



**Kuva 42.** Simulointiajon jännitteenmittaukset, kun takaiskun 14,66/21,86  $\mu$ s, 200 kA -pulssi on ajoitettu syöttöjännitteen negatiivisen jakson minimiin.



## 7.7 Tulosten pohdinta

Tuloksien perusteella voidaan päätellä, että suoran salamaniskun tapauksessa GIS-kojeiston ylijännitteen kestotaso on riittävä, myös varmuuskerroin huomioon otuna. Suoran salamaniskun simulointitulosten perusteella GIS-kojeiston avoimen katkaisijan ylijännitteet ovat pahimmassakin tapauksissa 319,2 kV, 463,7 kV, 410,5 kV tai 299,2 kV, eli kukin alle kojeistovalmistajan ilmoittaman salamasyöksyjännitteen kestotason 479 kV. Tästä poiketen voidaan tuloksista päätellä, että takaiskun tapauksessa GIS-kojeiston jännitteen kestotaso ei ole riittävä, sillä simulointien perusteella kojeiston avoimen katkaisijan ylijännitteet ovat 430,1 kV, 567,8 kV tai 567,5 kV. Varsinkin kahdessa jälkimmäisessä tapauksessa, kun impulssin oletetaan olevan 200 kA suuruinen, nousee jännite katkaisijassa lähes 90 kV suuremmaksi kuin mitä sen valmistaja suosittelee.

Työssä saatuja tuloksia on hyvä tulkita varauksella, sillä laskennan lähteet ovat pääosin vanhoja, useat 1980-luvulta. Toisaalta huomataan, että näitä ylijännitteisiin liittyviä tutkimuksia lainataan edelleen tänäkin päivänä, sillä korvaavia tutkimuksia ei ole tehty. Näin ollen tässäkin työssä käytettyjä tutkimuksia voidaan pitää ylijännite- ja salamatutkimuksien kulmakivinä. Lisäksi on huomattava, että laskennassa on jouduttu tekemään olettamuksia erinäisien vakioiden ja kertoimien suhteen, mikä saattaa johtaa lopputuloksen vääristymiseen, riippuen valituista kertoimista. Toisaalta muutos suuntaan tai toiseen on niin pieni kokonaisuutta ajatellen, ettei sillä käytännössä ole mitään merkitystä.

Simuloinnissa käytetty ylijännitesuojan malli on myös mahdollinen tuloksien vääristäjä, sillä siinä on käytetty ohjelman kirjastosta valmiiksi löytyviä metallioksidivaristori-elementtejä (MOV), joissa on jo tallennettuna erään ASEAn ylijännitesuojan VI-parametrit. Toisaalta sekä fyysisesti asennettujen että mallinnettujen suojien ollessa metallioksidisuoja ja niiden jännitetasojen ollessa samaa suuruusluokkaa, tämä aiheuttaa vain marginaalisen vääristymän. Lisäksi on huomioitava mallissa käytettyjen suojamoduulien MOV-elementtien oheiskomponentit ja niiden määrittäminen sekä niistä mahdollisesti aiheutuvat vääristymät. Toisaalta MOV-elementtien oheiskom-

ponenttien suuruuksia varioitiin kokeellisessa tarkoituksessa suuntaan ja toiseen, ja todettiin niiden vähäinen vaikutus tuloksiin.

Eräs työssä ilmenevä mahdollinen tuloksien vääristäjä on salamaimpulssigeneraattori. Työn edetessä huomattiin, että suoralle salamaniskulle käytetty yksinkertaisempi salamaimpulssigeneraattori ei sopinutkaan takaiskun erittäin nopeasti vaimenevalle pulssille. Näin ollen takaiskulle on jouduttu käyttämään Heidlerin tutkimaa vaimenemisyyhtälöä, joka mahdollistaa pulssin paremman muokkaamisen muun muassa nousujyrkkyyden kannalta. Lisäksi takaiskun maksimivirran tapaukselle on käytetty kahta eri pulssinmuotoa, toinen on skaalattu suoraan minimivirran pulssista ja toinen on ainoastaan amplitudiltaan eri kuin minimivirran pulssi. Näin ollen toinen takaiskun maksimivirran pulsseista on huomattavasti jyrkempi kuin toinen, jolloin saadaan kaksi toisistaan hyvin poikkeavaa tilannetta. Kuitenkin näistä kumpikin aiheuttaa amplitudiltaan lähes samansuuruisen kojeistolle ilmoitetun salamasyöksyjännitteen kestotason ylittävän ylijännitteen.

Simulointituloksissa yllättävää on se, että salamaimpulssin tapahtuessa negatiivisella syöttöjännitteen jaksolla, on muodostuva ylijännite suurempi kuin vastaavan impulssin tapahtuessa syöttöjännitteen positiivisella jaksolla (ks. liite 6). Tätä selittää mallin metallioksidisuojausmoduulin toiminta ja sen oheiskomponenttien negatiivinen varaus negatiivisella puolijaksolla. Toinen simulointituloksissa huomattu yllättävä seikka oli se, että maan resistiivisyys ei juuri vaikuttanut simuloinnin tuloksiin vaikka sitä varioitiin kokeellisesti kahden hyvin erilaisen maaperän, hyvin johtavan saven ja heikosti johtavan harjusoran, välillä.

## 8 YHTEENVETO

Venttiilisuojien onnistunut valinta ja sijoitus on tarkka tapauskohtainen prosessi, jossa on otettava huomioon varsin monia seikkoja, joihin vaikuttaa pääasiassa suojattavan kohteen ja käytettävän suojan ominaisuudet sekä asennuspaikan maantieteellisestä sijainnista ja korkeudesta aiheutuvat vaihtelut. Tärkeimpiä kriteerejä ovat seuraavat metallioksidisuojien ominaisuudet: suurin jatkuva käyttöjännite, pientaajuinen ylijännitteen sietokyky, mitoitusjännite, jäännösjännite, mitoituspurkausvirta sekä suojaustaso.

Ylijännitesuojauksen määrittäminen on usein hankalaa ja aikaavievää, varsinkin kun suojattavana kohteena on kaasueristeinen sähköasema, jonka keskeisenä osana toimiva kaasueristeinen kojeisto on varsin herkkä ylijännitteille, ja vaurioituessa aiheuttaa pitkän huoltokatkon. GIS-kojeiston yhteyteen asennettavat kaasueristeiset ylijännitesuojat ovat hankintahinnaltaan keskimäärin kymmenkertaisia vastaavaan perinteiseen metallioksidisuojaan nähden. Näin ollen jotta ylimääräisiltä investointikustannuksilta vältyttäisiin, on GIS-aseman ylijännitesuojauksen optimitason määrittäminen entistä tärkeämpää.

Tutkimustavoitetta on lähestytty teorialueen sekä esimerkkitalouksien liittyvien laskutoimituksien, mallinnuksen ja simuloinnin kautta. Erinäisillä laskutoimituksilla on selvitetty esimerkkitalouksessa mahdollisesti esiintyvien salamaimpulssien jyrkkyydet ja amplitudit, joiden perusteella käytettävät salamaimpulssigeneraattorit on mallinnettu, säädetty ja ajoitettu. Mallinnettu esimerkkitalouksen sähköaseman osa on sama kaikille simulointiajoille salamaimpulssigeneraattoreita ja niiden parametreja lukuun ottamatta. Täten samalla mallilla on pienin muutoksin saatu simuloitua seitsemän eri tilannetta, joiden perusteella GIS-kojeistossa esiintyviä ylijännitteitä on arvioitu ja niitä verrattu kojeistotoimittajan ilmoittamaan ylijännitteen kestotasoon.

Simulointituloksien perusteella voidaan päätellä, että suoran salamaniskun kannalta GIS-kojeiston ylijännitesuojausta ei ole tarvetta tehostaa kaasueristeisillä ylijännitesuojilla, sillä kojeiston salamasyöksyjännitteen kestoarvo ei ylity. Sen sijaan takaiskun kannalta tilanne on täysin päinvastainen, sillä takaiskun oletettavan maksimivirran

tapauksessa GIS-kojeiston katkaisijassa mitattu ylijännite on lähes 90 kV suurempi kuin sen valmistajan sille ilmoittama kestotaso. Näin ollen takaiskun kannalta suojauksen tehostaminen kaasueristeisillä suojilla saattaisi tulla kyseeseen. Toisaalta ennen kaasueristeisien suojien hankintaa on syytä huomioida GIS-kojeiston asennuspaikka ja siihen liittyvä ukkosen todennäköisyys, maksimivirralla tapahtuvan salamaniskun todennäköisyys sekä muut todennäköisyydet liittyen laitteisiin ja niiden tiloihin, joilla simulointi ja laskutoimitukset on tehty.

Yksinomaan tämän työn tuloksien perusteella kaasueristeisien suojien tarvetta esimerkkitapauksen GIS-kojeistossa ei voida määrittää. Sen sijaan työn perusteella pystytään määrittämään salamaimpulssien aiheuttamat ylijännitteet ja täten arvioida todennäköisyystutkimuksen tarvetta. Näin ollen työlle asetettuun tavoitteeseen ei aivan päästä, sillä suositusta esimerkkitapauksen kaasueristeisien suojien poisjättämiselle tai pitämiselle ei voida antaa. Jatkotutkimukselle eli yksityiskohtaiselle todennäköisyystarkastelulle on aihetta aina silloin, kun jokin simuloitu ylijännite ylittää kojeiston jännitteen kestotason. Mikäli kestotaso ei ylity missään tapauksessa, ei todennäköisyystarkastelulle ole aihetta, sillä kojeiston oletetaan silloin kestävän kaikki siinä paikalla ja sillä kokoonpanolla esiintyvät ylijännitteet. Esimerkkitapausta on siis vielä tarkasteltava todennäköisyyksien näkökulmasta, jotta saadaan lopullinen arvio tehostetun suojauksen tarpeesta.

## LÄHDELUETTELO

- 3Dchem.com. *Chemistry, Structures & 3D Molecules*. [Viitattu 19.04.2012]. Saatavana internetistä: <URL: <http://www.3dchem.com/inorganicmolecule.asp?id=653#>>.
- ABB Oy (2000). *Teknisiä tietoja ja taulukoita -käsikirja*. 9. painos. 626 s.
- ABB Ag, Gremmel H., G. Kopatsch (2006). *Switchgear Manual*. 11th edition. 896 s.
- ABB Group (2009). *Gas Insulated Switchgear, Modular and flexible, 52 - 1100 kV*. Overview. 13 s.
- ABB Switzerland Ltd. (2011a). *Gas-insulated Switchgear Type ELK-14, The modular system for GIS, 300 kV*. Product brochure. 24 s.
- ABB Switzerland Ltd. (2011b). *Overvoltage Protection, Metal oxide surge arresters in medium voltage systems*. Application guidelines. 88 s.
- ABB Ab (2012). *High Voltage Surge Arresters*. Buyer's Guide. 124 s.
- Ahonen, P. (2010). *Keskijänniteverkkojen ylijännitesuojaus- ja jälleenkytkentätarkastelut ylijännitelaskentaohjelmiston avulla*. Sähkövoimatekniikka. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. 84 s.
- Anderson, R. & A. Eriksson (1980). Lightning Parameters for Engineering Application. Cigre Study Committee 33. *Electra No 69*. 65 - 102.
- Aro, M., J. Elovaara, M. Karttunen, K. Nousiainen & V. Palva. (2003). *Suurjännitetekniikka*. 2. painos. Helsinki: Oy Yliopistokustannus / Otatieto. 520 s.
- Brown, W. (1978). Lightning Performance - 1 Shielding Failures Simplified. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. PAS-97: 1. 33 - 38.

- Brown, W. & S. Thunander (1976). Frequency of Distribution Arrester Discharge Currents Due to Direct Strokes. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. PAS-95: 5. 1571 - 1578.
- Elahi, H., M. Sublich, M. E. Anderson & B. D. Nelson (1990). Lightning Overvoltage Protection of the Paddock 362-145 kV Gas-Insulated Substation. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 5:1. 144 - 150.
- Elovaara, J. & L. Haarla. (2011). *Sähköverkot II - Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet*. Helsinki: Otatieto. 551 s.
- Eriksson, A., L. Deller, G. Baldo, C. H. Bouqueneau, H. Darveniza, J. Elovaara, E. Garbagnati, C. Gary, I. Grant, A. Hileman, R. Houlgate, J. Huse, W. Janischewskyj, T. Kawamura, F. Popolansky, F. Rilhling & K-H. Weck (1991). *Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines*. Cigre Study Committee 33. 63 s.
- Eriksson, A., K. Weck (1988). *Simplified Procedures for Determining Representative Substation Impinging Overvoltages*. Cigre Study Committee 33. 8 s.
- German, D.A. & A. Haddad (2004). Overvoltages and insulation coordination on transmission networks. *Advances in High Voltage Engineering. IET Power and Energy Series 40*. 309 - 347.
- Göhler, R. & L. Klingbeil (2006). Special Requirements on Gas-Insulated Metal-Oxide Surge Arresters. *International Conference on Power System Technology. PowerCon 2006*. 1-6.
- Hasse, P. (2003). *Overvoltage Protection of Low Voltage Systems*. 2nd edition. London: The Institution of Electrical Engineers. 359 s.
- Haveri, P. (2006). *Kaupunkisähköaseman elinkaaren hallinta*. Sähkö- ja tietoliikennetekniikka. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. 110 s.

- Heidler, F. (1985). Traveling current source model for LEMP calculation. *6th International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 29F2, 157 - 162.
- Hileman, A. R. (1999). *Insulation Coordination for Power Systems*. Florida: Taylor & Francis Group. 767 s.
- Hinrichsen, V. (2001). *Metal-Oxide Surge Arrester - Fundamentals*. 1st edition. 120 s. Saatavana internetistä: <URL: <http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-transmission/high-voltage-products/surge-arresters-and-limiters/aboutus/arrester-book-1400107.pdf>>.
- Holaus, W. & F. Stucki (2008). Ultra-high-voltage switchgear to power China. *ABB Review*. 08:4, 20 - 24.
- IEC 60071-1 (2006). *Insulation co-ordination - Part 1: Definitions, principles and rules*. International Standard. Edition 8.0.
- IEC 60071-2 (1996). *Insulation co-ordination - Part 2: Application guide*. International Standard. 3<sup>rd</sup> Edition.
- IEC 60099-5 (2000). *Surge arresters - Part 5: Selection and application recommendations*. Edition 1.1.
- IEC 60376 (2005). *Specification of technical grade sulfur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) for use in electrical equipment*. International Standard. 2<sup>nd</sup> Edition.
- IEC 60480 (2004). *Guidelines for checking and treatment of sulfur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) taken from electrical equipment and specification for its re-use*. International Standard. 2<sup>nd</sup> Edition.
- IEC 62271-203 (2011). *High-voltage switchgear and controlgear - Part 203: Gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages above 52 kV*. International Standard. Edition 1.0.

- IEC 62271-205 (2008). *High-voltage switchgear and controlgear - Part 205: Compact switchgear assemblies for rated voltages above 52 kV*. International Standard. Edition 1.0.
- IEC 62271-209 (2007). *High-voltage switchgear and controlgear - Part 209: Cable connections for gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages above 52 kV - Fluid filled and extruded insulation cables - Fluid filled and dry-type cable-terminations*. International Standard. Edition 1.0.
- IEC 62271-303 (2008). *High-voltage switchgear and controlgear - Part 303: Use and handling of sulphur hexafluoride (SF<sub>6</sub>)*. Technical Report. Edition 1.0.
- IEEE C62.22 (2009). *IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems*. IEEE Std C62.22-2009.
- IEEE WG 3.4.11 (1992). Modeling of metal oxide surge arresters. *IEEE Transaction on Power Delivery*. 7:1, 302 - 309.
- Imataki, M., K. Ujita, Y. Fujiwara, S. Ishibe & T. Nitta (1984). Advanced Metal Oxide Surge Arrester for Gas Insulated Switchgear (GIS). *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*. 103:10, 2990 - 2998.
- Kessel, J., V. Atlason, C. L. Bak, J. Lund (2008). Lightning simulation of a combined overhead line/cable connected GIS. *29th International Conference on Lightning Protection*. [Siteerattu 05.10.2012]. 6a-6-1-6a-6-15. Saatavana internetistä: <URL: [http://vbn.aau.dk/files/14618229/Lightning\\_simulation\\_of\\_a\\_combined\\_overhead\\_line\\_cable\\_connected\\_GIS.pdf](http://vbn.aau.dk/files/14618229/Lightning_simulation_of_a_combined_overhead_line_cable_connected_GIS.pdf)>.
- Francisco, de la Rosa, P. Chowdhuri, S. R. Lambert, J. A. Martinez-Velasco, R. C. Degeneff & W. Chisholm (2001). Power System Transients. *The Electric Power Engineering Handbook*. Florida: Taylor & Francis Group. 1496 s.



- Osborne, M., A. Xemard, L. Prikler & J. A. Martinez (2007). Points to consider regarding the insulation coordination of GIS substations with cable connections to overhead lines. *International Conference on Power System Transients*. 5 s. [Siteerattu 05.10.2012]. Saatavana internetistä: <URL: [http://www.ipst.org/techpapers/2007/ipst\\_2007/papers\\_IPST2007/Session7/113.pdf](http://www.ipst.org/techpapers/2007/ipst_2007/papers_IPST2007/Session7/113.pdf)>.
- Paris, L. (1967). Influence of Air Gap Characteristics on Line-to-Ground Switching Surge Strength. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. PAS-86: 8. 936 - 947.
- Partanen, J. (2011). *Suurjännitetekniikka, syöksyaallot*. Luentomoniste. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. [Siteerattu 20.03.2012]. Saatavana internetistä: <URL: <https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bl20a0300/luennot/syöksyaallot.pdf>>.
- Pascal, S. Dry Terminations for High Voltage Cable System. [Siteerattu 20.03.2012]. Saatavana internetistä: <URL: [http://www-eng.lbl.gov/~shuman/NEXT/MATERIALS&COMPONENTS/HV/dry\\_terminations\\_TS1001\\_FP.pdf](http://www-eng.lbl.gov/~shuman/NEXT/MATERIALS&COMPONENTS/HV/dry_terminations_TS1001_FP.pdf)>.
- Pryor, B. M. & B. Richter (1998). Overvoltage Protection in Open Air Terminal and GIS in the 145 kV Distribution System. *Fifth International Conference on Trends in Distribution Switchgear*. Conference Publication No 459. 139 - 144.
- Richter, B. (1994). GIS - MO - Surge Arresters for 145 kV - Systems. *Fourth International Conference on Trends in Distribution Switchgear*. Conference Publication No. 400. 178 - 182.
- Ruppa, E. (2001). *Ylijännitteet*. Luentomoniste. Satakunnan ammattikorkeakoulu. [Siteerattu 20.03.2012]. Saatavana internetistä: <URL: <http://salabra.tp.samk.fi/er/siirto/yljannitteet.doc>>.

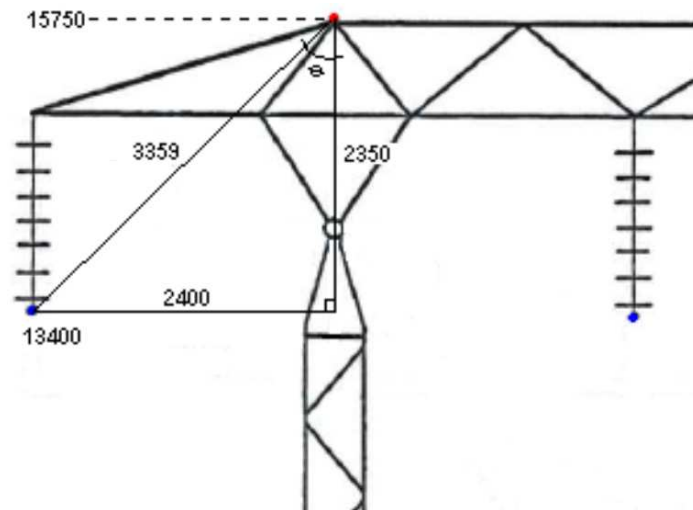
Siemens Ag. (2008). *3ES Surge Arrester*. 12 s. Saatavana internetistä: <URL: <http://www.energy.siemens.com/co/pool/hq/power-transmission/high-voltage-products/surge-arresters-and-limiters/high-voltage-arresters-with-metal-enclosure-3es/surge-arresters-with-metal-enclosure/aboutus/3es-en.pdf>>.

Suomen Sähkölaitosyhdistys r.y. (1992). *Metallioksidisuojat sekä niiden valinta ja sijoitus*. Julkaisusarja. Helsinki: Suomen sähkölaitosyhdistys r.y. 53 s.

Tomomi, N., Y. Takeshi, M. Azuma, Z. Eiichi & I. Masaru (2000). Observation of Current Waveshapes of Lightning Strokes on Transmission Towers. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 15:1. 429 - 435.

Tyco Electronics Raychem GmbH. (2008). *Metal Oxide Surge Arresters Selection and Application in Medium Voltage Power systems*. 24 s. Saatavana internetistä: <URL: [http://raychem.kz/te/catalogs/eng/Surge\\_Arresters\\_for\\_Medium\\_Voltage\\_Power\\_System.pdf](http://raychem.kz/te/catalogs/eng/Surge_Arresters_for_Medium_Voltage_Power_System.pdf)>.

## LIITTEET

**Liite 1. Esimerkkitapauksen parametrit****A) Pylvään mittatiedot**

Suurimman salamavirran mahdollistavan avojohtolinjan mittatiedot.

**B) Johtojen keskiarvoiset korkeudet**

Ukkosjohtimen korkeuden keskiarvo 5 m riippumalla on

$$15,75 \text{ m} - \frac{2}{3} 5,0 \text{ m} = 12,42 \text{ m}.$$

Vaihejohtimen korkeuden keskiarvo 5 m riippumalla on

$$13,40 \text{ m} - \frac{2}{3} 5,0 \text{ m} = 10,07 \text{ m}.$$

**C) Avojohtolinjan vaihejohtimen aaltoimpedanssi**

Vaihejohtimen aaltoimpedanssi korkeudella 10,07 m ja johtimen säteellä 0,01205 m on

$$60 \cdot \ln \frac{2 \cdot 10,07}{0,01205} \Omega = 445,26 \Omega.$$

**Liite 2. Laskutoimitukset: suora salamanisku****A) Suurin salamavirta**

Suurin iskuetäisyys on

$$\frac{3,359^2 \text{ m} (12,42 \text{ m} + 10,07 \text{ m}) + 2 \cdot 3,359 \text{ m} \cdot 2,40 \text{ m} \sqrt{12,42 \text{ m} \cdot 10,07 \text{ m}}}{2 (12,42 \text{ m} - 10,07 \text{ m})^2} = 39,30 \text{ m}.$$

Suurin salamavirta, kun kertoimina käytetään 7,1 ja 0,75, on

$$\left( \frac{39,30 \text{ m}}{7,1} \right)^{\frac{1}{0,75}} = 9,79 \text{ kA}.$$

**B) Kriittiset salamavirrat**

Kriittinen ylilyöntijännite, kun elektrodien muodosta määräytyvä kerroin on 1,5 ja sen korjauskerroin on 0,94 sekä kuvasta arvioitu eristimen pituus on 1,50 m, on

$$1,5 \cdot 0,94 \cdot 500 \cdot 1,50 \text{ m} = 1057,50 \text{ kV}.$$

Kriittinen salamavirta on

$$2 \frac{1057,50}{445,26} = 4,75 \text{ kA}.$$

Vaihejännitteen huippuarvo, kun suurin käyttöjännite on 123 kV, on

$$123 \text{ kV} \sqrt{\frac{2}{3}} = 100,4 \text{ kV}.$$

Syöttöjännitteen positiivisella huipulla vaikuttava kriittinen salamavirta on

$$4,75 \text{ kA} + 2 \frac{100,4 \text{ kV}}{445,26 \Omega} = 5,20 \text{ kA}.$$

Syöttöjännitteen negatiivisella huipulla vaikuttava kriittinen salamavirta on

$$4,75 \text{ kA} - 2 \frac{100,4 \text{ kV}}{445,26 \Omega} = 4,30 \text{ kA}.$$

**C) Suurimman salamavirran rinnan nousuaika**

Salamavirran jyrkkyys (ei ensimmäinen isku) suurimmalla iskuvirralla iskupaikassa on

$$3,8 \cdot 9,79^{0,93} \text{ kA} = 31,71 \frac{\text{kA}}{\mu\text{s}}.$$

Suurimman salamavirran rinnan nousuaika on

$$\frac{9,79 \text{ kA}}{31,71 \frac{\text{kA}}{\mu\text{s}}} = 0,31 \mu\text{s}.$$

**D) Kriittisten salamavirtojen rinnan nousuajat**

Salamajännitteen jyrkkyys avojohdon ja kaapelin liittynässä, kun koronanvaimennuskerroin on  $1,5 \cdot 10^{-6} \mu\text{s}/(\text{kVm})$ , on

$$\frac{1}{1,5 \cdot 10^{-6} \frac{\mu\text{s}}{\text{kVm}} \cdot 250 \text{ m} + \frac{2}{31,71 \frac{\text{kA}}{\mu\text{s}} \cdot 445,26 \Omega}} = 1935,54 \frac{\text{kV}}{\mu\text{s}}.$$

Salamavirran jyrkkyys avojohdon ja kaapelin liittynässä on

$$2 \frac{1935,54 \frac{\text{kV}}{\mu\text{s}}}{445,26 \Omega} = 8,70 \frac{\text{kA}}{\mu\text{s}}.$$

Positiivisen kriittisen salamavirran rinnan nousuaika on

$$\frac{5,20 \text{ kA}}{8,70 \frac{\text{kA}}{\mu\text{s}}} = 0,60 \mu\text{s}.$$

Negatiivisen kriittisen salamavirran rinnan nousuaika on

$$\frac{4,30 \text{ kA}}{8,70 \frac{\text{kA}}{\mu\text{s}}} = 0,49 \mu\text{s}.$$

**Liite 3. Laskutoimitukset: takaisku**

**A)** Pienin takaiskun aiheuttava salamavirta avojohtolinjalla

Vaimenevan pulssin aikavakioksi saadaan

$$\frac{270 \, \Omega \cdot 250 \, \text{m}}{200 \, \Omega \cdot 298 \frac{\text{m}}{\mu\text{s}}} = 1,13 \, \mu\text{s}.$$

Pienin takaiskun aiheuttava salamavirta, kun kytkentäkerroin on 0,35 ja eristimen kriittinen ylilyöntijännite on 1057,5 kV, on

$$\frac{1057,5 \, \text{kV} \left(1 + \frac{2}{1,13 \, \mu\text{s}}\right) - 100,4 \, \text{kV}}{(1 - 0,35) 200 \, \Omega} = 21,73 \, \text{kA}.$$

**B)** Salamaimpulssin rinnan nousuaika pienimmällä takaiskuvirralla

Pienimmän takaiskuvirran aiheuttama jännite eristimessä, kun kytkentäkerroin on 0,35, on

$$21,73 \, \text{kA} (1 - 0,35) 200 \, \Omega + 100,4 \, \text{kV} = 2925,0 \, \text{kV}.$$

Takaiskun aiheuttama jännitteen jyrkkyys, kun  $T_{\text{fr}}$  oletetaan olevan 0,5  $\mu\text{s}$ , on

$$\frac{1}{1,5 \cdot 10^{-6} \frac{\mu\text{s}}{\text{kVm}} \cdot 250 \, \text{m} + \frac{0,5 \, \mu\text{s}}{1294,5 \, \text{kV}}} = 1831,7 \frac{\text{kV}}{\mu\text{s}}.$$

Salamaimpulssin rinnan nousuaika on

$$\frac{2925,0 \, \text{kV}}{1831,7 \frac{\text{kV}}{\mu\text{s}}} = 1,60 \, \mu\text{s}.$$

**C)** Salamaimpulssin selän puoliarvonaika

Selän puoliarvonaika on

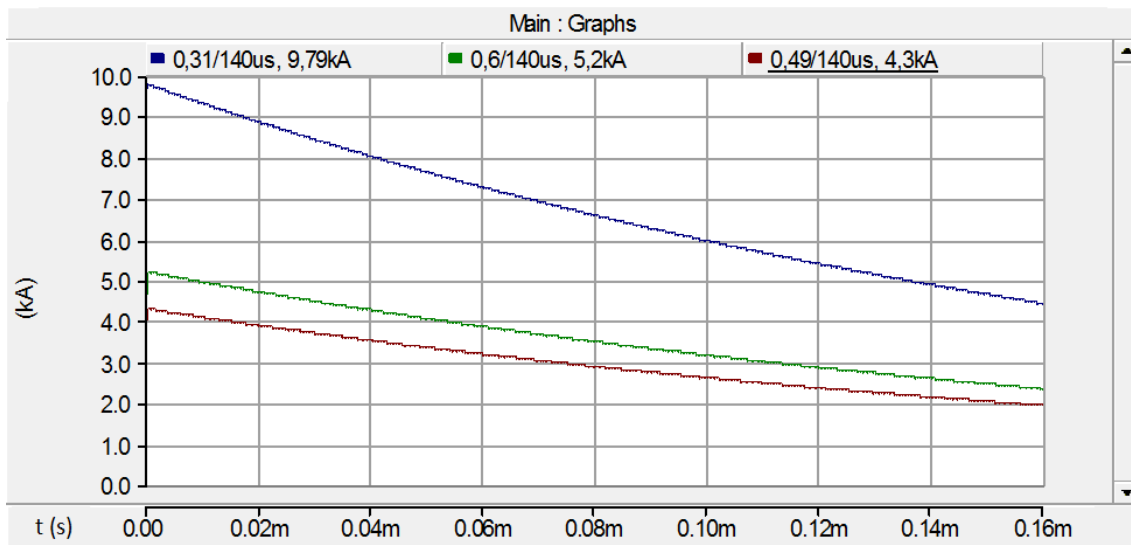
$$1,13 \, \mu\text{s} \cdot \ln(2) = 0,78 \, \mu\text{s}.$$

**Liite 4. Laskutoimitukset: ylijännitesuojan energianpurkaustarve**

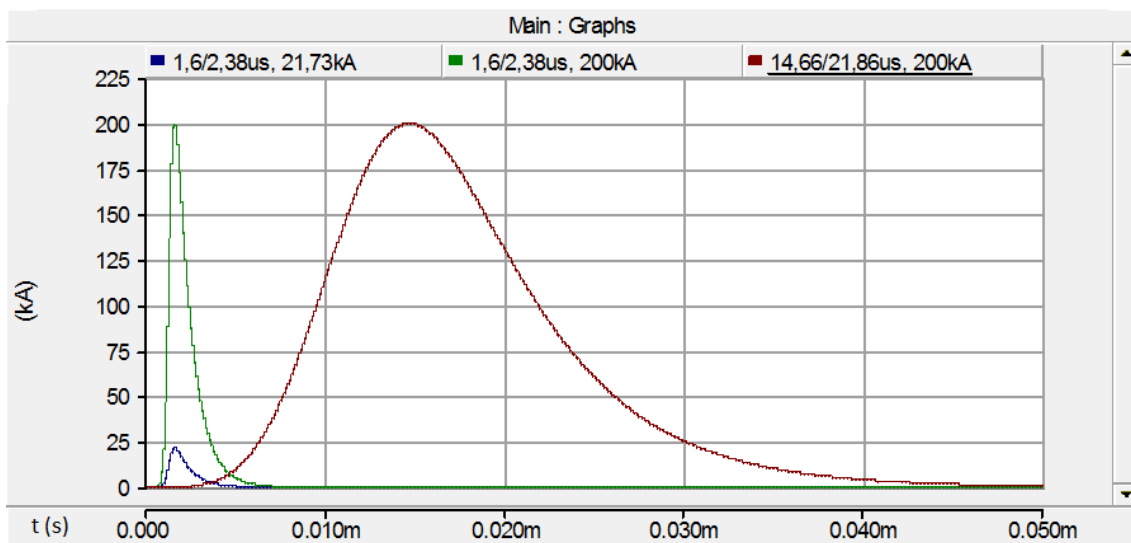
Ylijännitesuojan energianpurkaustarve on

$$\left( 2 \cdot 1057,5 \text{ kV} - 1 \cdot 342 \text{ kV} \left( 1 + \ln \frac{2 \cdot 1057,5 \text{ kV}}{342 \text{ kV}} \right) \right) \frac{342 \text{ kV} \cdot 0,3 \text{ ms}}{249 \Omega} = 473,8 \text{ kJ}.$$

### Liite 5. Simuloinnissa käytetyt salamaimpulssit



Esimerkkitapauksen suorien salamaniskuimpulssien virrat ajan funktiona.

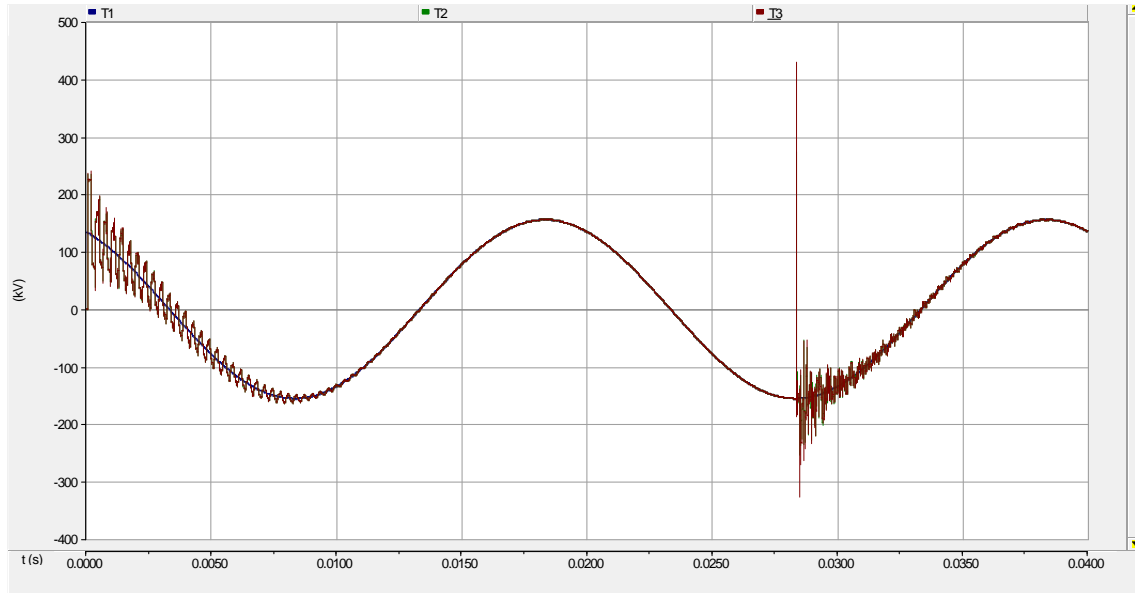


Esimerkkitapauksen takaiskuimpulssien virrat ajan funktiona.

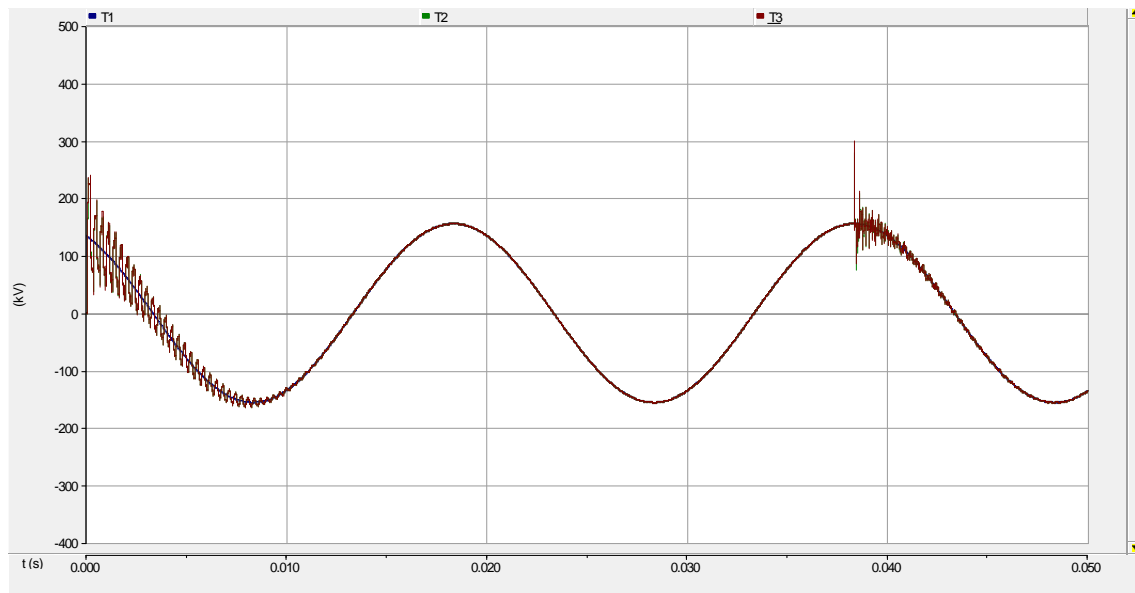


## Liite 6. Simuloinnissa käytettyjen salamaimpulssien ajoitus

Alla on esitettyä 0,31/140  $\mu$ s, 9,79 kA -pulssin ajoitus syöttöjännitteen negatiivisen jakson minimiin sekä positiivisen jakson maksimiin, ja siitä aiheutuvat ylijännitteet.



Syöttöjännitteen negatiivisen jakson minimiin ( $t = 0,028339$  s) ajoitetun esimerkki-impulssin aiheuttama ylijännite ajan funktiona.



Syöttöjännitteen positiivisen jakson maksimiin ( $t = 0,038299$  s) ajoitetun esimerkki-impulssin aiheuttama ylijännite ajan funktiona.